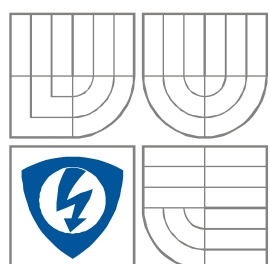


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **Akustická detekce výstřelů ve volné přírodě**

Acoustical detection of gunshots in the open

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

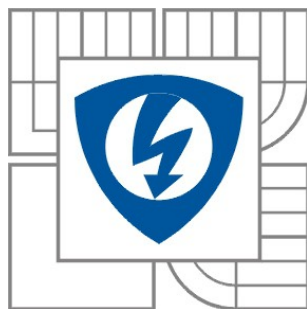
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Martin Hrabina

**VEDÚCI PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.

BRNO, 2015



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta Elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

## **Diplomová práce**

magisterský navazující studijní obor

**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Martin Hrabina

**ID:** 136522

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014 / 2015

**NÁZEV TÉMATU:**

**Akustická detekce výstřelů ve volné přírodě**

### **POKYNY K VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou detekce klíčových zvuků charakterizujících výstřely ze střelných zbraní v měnícím se akustickém pozadí ve volné přírodě. Vytvořte přehledovou studii o významných publikacích, softwarových nástrojích a hardwarových modulech k určování takových zvuků. Navrhněte a simulací ověřte vhodný algoritmus na okamžitou detekci výstřelů. Předpokládá se aktivní podíl na vytváření nahrávek v reálném prostředí. Vytvořený algoritmus realizujte formou autonomní jednotky v miniaturním provedení vhodném pro zabudování do sloních obojků. Vstupem bude signál z mikrofону, výstupem binární informace o výstřelu. Systém optimalizujte na malou spotřebu.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] JAN, J. Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů. Brno: VUT v Brně, 2002.

[2] MAHER, R.C. Acoustical Characterization of Gunshots. In Proceedings of the IEEE Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics SAFE 2007. Washington D.C.: 2007, p. 109-113.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 21.5.2015

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.

**Konzultanti diplomové práce:** Arthur Sniegon

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

Předseda oborové rady

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zaoberá detekciou a rozpoznávaním výstrelů. Obsahuje prehľad publikovaných prác a zhrnutie používaných metód. Ďalej zoznamuje s niekoľkými komerčnými prevedeniami detektorov výstrelů. V práci je navrhnutý a overený algoritmus určený na binárne rozlišovanie medzi výstrelom a inými zvukmi vyskytujúcimi sa v prostredí v prostredí Matlab. Tento algoritmus je implementovaný na signálovom procesore TMS320C6713 a dosiahnuté výsledky sú porovnané.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Rozpoznanie streľby, korelácia, LPC koeficienty, detekcia impulzných zvuků

## **ABSTRACT**

This work is concerned with gunshot detection and recognition. Contains overview of published works and methods used in this field. Furthermore, it lists several commercial gunshot detectors. Binary gunshot detection and recognition algorithm is proposed which discriminates between gunshot and non-gunshot sounds occurring in nature. Algorithm is tested in Matlab. Proposed algorithm is implemented in TMS320C6713 digital signal processor, achieved results are compared.

## **KEYWORDS**

Gunshot recognition, correlation, linear predictor coding, impulsive signal detection

HRABINA, M. *Akustická detekce výstřelů ve volné přírodě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 39 s. Diplomová práce. Vedúci práce: prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.

# PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Akustická detekce výstřelů ve volné přírodě som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej semestrálnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto semestrálnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>1 PROBLEMATIKA A POŽIADAVKY</b>	<b>2</b>
<b>2 PREHLAD PUBLIKÁCIÍ A NÁSTROJOV</b>	<b>3</b>
2.1 Detekcia impulzných signálov.....	3
2.2 Rozpoznanie výstrelov.....	5
2.3 Dostupné zariadenia.....	8
<b>3 NÁVRH SYSTÉMU</b>	<b>11</b>
3.1 Databáza zvukov.....	11
3.2 Pracovná metóda.....	12
3.3 Korelácia.....	15
3.4 Pásmová filtrácia.....	16
3.5 Lineárna predikcia.....	17
<b>4 IMPLEMENTÁCIA</b>	<b>19</b>
4.1 TMS320C6713 Starter kit.....	20
4.2 DSP/BIOS.....	21
4.3 Vstupný signál.....	22
4.3.1 McBSP.....	24
4.3.2 EDMA.....	25
4.4 Fourierova transformácia.....	26
4.5 Korelácia.....	27
4.6 LPC koeficienty.....	28
4.7 Pásmová filtrácia.....	29
4.8 Výsledná realizácia výpočtov.....	30
<b>5 VÝSLEDKY A VYHODNOTENIE</b>	<b>32</b>
5.1 Simulácia.....	32
5.2 Výsledky na signálovom procesore.....	34
5.3 Porovnanie dosiahnutých výsledkov.....	35
<b>6 ZÁVER</b>	<b>38</b>

# **ZOZNAM OBRÁZKOV**

<b>Obrázok 1: Výstrel zo samopalu a jeho spektrum</b>	<b>11</b>
<b>Obrázok 2: Výstrel z pušky a jeho spektrum</b>	<b>12</b>
<b>Obrázok 3: Záznam štekania a výsledok detekcie</b>	<b>13</b>
<b>Obrázok 4: Bloková schéma</b>	<b>14</b>
<b>Obrázok 5: LPC kritériá</b>	<b>14</b>
<b>Obrázok 6: Kritérium LPC</b>	<b>14</b>
<b>Obrázok 7: Bloková schéma banky filtrov</b>	<b>16</b>
<b>Obrázok 8: LPC a FFT spektrum samohlásky "a"</b>	<b>18</b>
<b>Obrázok 9: Vývojový diagram</b>	<b>19</b>
<b>Obrázok 10: Bloková schéma C6713 [12]</b>	<b>20</b>
<b>Obrázok 11: Stavy procesov</b>	<b>21</b>
<b>Obrázok 12: Prepínanie procesov</b>	<b>22</b>
<b>Obrázok 13: TMS320C6713 DSK kodek [12]</b>	<b>23</b>
<b>Obrázok 14: Časovanie v móde DSP</b>	<b>25</b>
<b>Obrázok 15: Detekcia troch výstrelův zo samopalu</b>	<b>34</b>
<b>Obrázok 16: Výsledné korelácie pre dva výstreli</b>	<b>36</b>

# ZOZNAM TABULIEK

<b>Tabuľka 1: Zhodnotenie úspešnosti detekčných metód</b>	<b>4</b>
<b>Tabuľka 2: Výsledky metód pre lineárny kernel</b>	<b>6</b>
<b>Tabuľka 3: Výsledky pre RBF kernel</b>	<b>6</b>
<b>Tabuľka 4: Porovnanie výpočetnej náročnosti v daných podmienkach</b>	<b>27</b>
<b>Tabuľka 5: Falošné alarmy pre jedno kritérium</b>	<b>32</b>
<b>Tabuľka 6: Falošné alarmy pre viacero kritérií</b>	<b>32</b>
<b>Tabuľka 7: Správne detekcie výstrelů</b>	<b>33</b>
<b>Tabuľka 8: Správne detekcie na procesore</b>	<b>34</b>
<b>Tabuľka 9: Falošné alarmy na procesore</b>	<b>35</b>



# ÚVOD

Úlohou diplomovej práce je zhrnúť a porovnať existujúce publikácie zaoberajúce sa detekciou a rozpoznávaním výstrelů a literatúru s týmito úlohami súvisiacu, ako je detekcia iných impulzných zvuků. Ďalším cieľom je zmapovať existujúce zariadenia na detekciu výstrelů v rôznych aplikáciach.

Hlavným cieľom je navrhnúť a otestovať algoritmus spoľahlivo detekujúci výstrel z akustického signálu snímaného v reálnom čase a odlíšiť ich od ostatných zvuků. Algoritmus má byť ďalej použitý pri realizácii samostatnej jednotky spracúvajúcej zvuk v reálnom čase, jej výstupom by mal byť binárny detektor.

Predpokladá sa použitie realizovaného zariadenia v súčinnosti s existujúcimi GPS obojkami, ktoré sú v súčasnosti používané na zasielanie údajů o polohe sloních stád správe národných parků. Cieľom rozšírenia je upozorniť strážcov na pytlakov a umožniť tak rýchlu reakciu. Z tohto pohľadu teda vyplývajú priority celého zariadenia. Je potrebný dostatočný pomer detekovaných výstrelů k celkovému množstvu, podstatnejším parametrom však bude nízky počet falošných alarmů vzhľadom na častejšiu prítomnosť cudzích impulzných zvuků a postačujúcu detekciu niekoľkých výstrelů na vyslanie hliadky. Dodatočným požiadavkom je čo najnižšia spotreba celého zariadenia, výmena obojků je totiž náročný proces a tak je nutná čo najdlhšia životnosť, v súčasnosti je výdrž obojků približne tri roky. Ako teda vyplýva z textu, zadaním nieje zariadenie klasifikujúce zvuky do rôznych kategórií ale iba binárny detektor upozorňujúci na prítomnosť výstrelu.

V tejto práci je v programe Matlab navrhnutý a overený detekčný algoritmus, v ďalšom kroku je tento algoritmus implementovaný v digitálnom signálovom procesore TMS320C6713 DSK. Záverom práce sú porovnané dosiahnuté výsledky, diskutované rozdiely medzi výstupmi simulácií a realizácie a navrhnuté možné príčiny týchto rozdielů. V závere sú spomenuté ďalšie kroky ktoré sú potrebné pri kompletnej realizácii tohto zariadenia.

# 1 PROBLEMATIKA A POŽIADAVKY

Prvá kapitola stručne zhŕňa problematiku a opisuje súčasný stav detekcie a rozpoznávania výstrelov. Stanovuje základné požiadavky na systém a porovnáva ich s podobnými systémami používanými vo vojenskom a bezpečnostnom odvetví.

Cieľom tejto práce je vybrať vhodný algoritmus na detekciu a rozlišovanie zvuku strelby medzi ostatnými zvukmi prostredia. Podobné zariadenia sú čoraz častejšie najmä vo vojenskom priemysle a u bezpečnostných zložiek. Charakter tejto práce však kladie v mnohých ohľadoch odlišné požiadavky na zariadenie ktoré bude cieľom naväzujúcej diplomovej práce.

Výsledné zariadenie má slúžiť ako modul do už existujúcich GPS obojkov mapujúcich pohyb slonov vo voľnej prírode s cieľom ich ochrany pred pytlákmi. Tento modul má za cieľ zefektívnenie ochrany privolaním vzdialenej hliadky pri rozpoznaní výstrelu, z toho vyplývajú nižšie uvedené požiadavky.

Zo vzdialenosti potrebnej na osobné overenie strelby vyplýva nutnosť minimalizovať množstvo falošných alarmov, vzhľadom k charakteru pytliactva ale na druhú stranu nieje kritická stopercentná detekcia a rozpoznanie výstrelov, keďže tie môžu byť nahlásené až na druhý, prípadne tretí výstrel. Stanovenie rizika falošného alarmu oproti nezistenému výstrelu teda ku koncu ostáva na samotných ochranároch kvôli ich znalosti miestnych podmienok a požiadaviek. Na rozdiel od vojenských aplikácií sa pri tomto zariadení znižuje aj striktná požiadavka na reakčný čas zariadenia, vojenské aplikácie vyžadujúce reakčný čas pod jednu sekundu odrážajú potrebu okamžitej odpovede, vzhľadom na dlhú dojazdovú dobu na miesto výstrelu môže toto zariadenie využívať viac času na overenie správnosti detekcie a rozpoznania výstrelu. Taktiež nieje potrebná presná lokalizácia strelca, na rozdiel od vojenských prevedení. Komplikáciou oproti vojenským zariadeniam však je požiadavka na dlhú výdrž zariadenia kvôli obtiažnosti výmeny batérií, typické vojenské zariadenia sa nabíjajú denne, kdežto použiteľnosť tohoto zariadenia prichádza až pri výdrži od pol roka vyššie kvôli obtiažnosti výmeny obojkov, prípadne batérií, súčasné GPS obojky bez detekcie výstrelov majú výdrž až do troch rokov. Z plánovaného použitia vyplýva aj požadovaná mechanická odolnosť zariadenia proti poškodeniu ale aj proti vode, prachu a inému znečisteniu. Výsledkom však je dodatočná nemožnosť zmeny parametrov systému, táto by mohla byť riešená prípadným automatickým učením systému alebo možnosťou rádiového ovládania, ktorá by však kládla ďalšiu energetickú záťaž na celé zariadenie, dodatočná zmena parametrov však nieje predmetom tejto práce a môže byť riešená v rámci iného zadania.

## 2 PREHLAD PUBLIKÁCIÍ A NÁSTROJOV

Tento text zhŕňa doterajšie publikácie o problematike a ďalej poskytuje prehľad o známych softwarových nástrojoch a hardwarových moduloch slúžiacich na detekciu výstrelův.

### 2.1 Detekcia impulzných signálov

V súčasnosti je o detekciu výstrelův s prípadnou lokalizáciou rastúci záujem a to nielen v oblastiach ako je vojenský priemysel alebo verejná bezpečnosť, ale aj ochrana prírody. Hoci sa veľká časť zdrojův zaoberá skôr bezpečnosťou, čiže sa zameriava aj na lokalizáciu výstrelův prípadne určenie druhu zbrane a nekladie tak dôraz na nižšiu spotrebu, stále je užitočná aj v odvetví ochrany prírody. Z hľadiska energetickej efektivity je úloha rozdelená na energeticky menej náročnejšiu časť detekcie impulzných signálov, po detekcii tohoto signálu je aktivovaná náročnejšia časť ktorá má za účel rozpoznať, či sa jedná o výstrel alebo nie.

Prvá práca [1] porovnáva šesť algoritmov pre detekciu výstrelův. Tieto používajú najmä krátkodobú Fourierovu transformáciu, vlnkovú transformáciu, skryté Markovove modely, Gaussian mixtures, a maximum likelihood modely ktoré však majú vysokú spotrebu energie. Menovaná práca odporúča použiť detektor impulzův ktorý by následne spustil zložitejší a energeticky náročnejší algoritmus na zistenie, či ide o výstrel zo zbrane alebo o iný impulzný zvuk (praskanie konárov, špliechanie vody...).

Ako počiatočný detektor je navrhovaný komparátor s adaptívnou rozhodovacou úrovňou založenou na priemernom RMS (root mean square) vynásobenom vhodnou konštantou. Úspešnosť algoritmu je určená porovnávaním TPR (true positive rate) – správnych rozpoznaní a FPR (false positive rate) – chybných rozpoznaní.

Samotné porovnanie metód v [1] berie ako referenciu signál bez predspracovania. Na filtráciu je použitý low-pass Butterworth IIR filter štvrtého rádu s medznou frekvenciou 3 kHz. Ako prvé je navrhované použiť absolútnu hodnotu signálu pomocou použitia analógového usmerňovača s následným detektorom úrovně signálu, kde odhadovaná prúdová spotreba je 405 nA. Druhá metóda používa sedem vstupový mediánový filter (s použitím aktuálneho signálu a signálu zdržaného o 1-6ms). Pri tomto riešení však narážame na problém so zavedením oneskorenia, je treba uvažovať nad diskretizáciou signálu a to pridáva na energetickej náročnosti celého zariadenia. Tretia metóda navrhuje použitie Teager energy operátoru (TEO), ktorý je použitý na signál pred jeho vstupom do komparátora. Jeho diskrétna podoba je daná nasledujúcim vzorcom (1):

$$y(n) = x(n)^2 - x(n-1)x(n+1). \quad (1)$$

Tento operátor má zosilňovať vysokofrekvenčné zložky a tak je výhodný na detekciu impulzných signálov. Táto metóda môže byť aproximovaná aj analógovým

obvodom. Štvrtou metódou je použitie korelácie vstupného signálu a vzorového signálu. Pri porovnávaní bol použitý diskretizovaný signál so vzorkovacou frekvenciou 48 kHz, pre nižšiu spotrebu však bolo navrhované použitie zmiešaného signálu, prípadne zníženie vzorkovacej frekvencie alebo kvantizačných hladín, čo by sa však odrazilo na kvalite. Ďalej je korelácia impulzného signálu akým je aj výstrel veľmi závislá na prostredí, čo by však v pomerne homogénnom prostredí nemal byť problém. Keďže použitie digitálneho signálu je z hľadiska energetickej náročnosti nevýhodnejšie, boli navrhované zmiešané metódy [1] so spotrebou 30-50  $\mu\text{W}$ , tu nieje použitý priamo vstupný signál ale výstupy z napríklad vlnkovej transformácie. Ďalšou metódou je použitie vlnkovej transformácie Daubechies (DWT) so šiestimi nulovými momentami na detekciu impulzných signálov. V tomto prípade je použitá banka filtrov Haarových vlniek ôsmeho rádu na 7 kHz podvzorkovaný signál. Banka filtrov je štrukturovaná dyadicky s Nyquistovou frekvenciou 3,5 kHz s dĺžkou vstupov 2048 vzoriek. Na základe ďalšej analýzy boli vybrané výstupy z úrovne 3,4 a 5, tie slúžia ako vstup komparátora. Posledná metóda používa spojitú vlnkovú transformáciu (CWT), Morletove alebo Gaussove vlnky. Implementácia však môže byť zložitá a nejednoznačná. Konštrukčne jednoduchšie by mohlo byť zredukovať prenosovú funkciu každého filtra na pásmovú priepusť podobnú kochleárnemu filteru avšak s použitím paralelnej štruktúry. Vznikla by teda paralelná štruktúra troch pásmových priepustí tretieho alebo štvrtého rádu. Frekvenčné rozsahy sa volia na základe predchádzajúcej DWT analýzy. Na vstup je ďalej zaradená horná priepusť kvôli prípadnému offsetu a  $1/f$  šumu.

Tabuľka 1 [1] uvádza výsledky dosiahnuté použitými metódami. Kde „vzdialenosť“ určuje euklidovskú vzdialenosť od bodu  $[\text{TPR}, \text{FPR}] = [1, 0]$ , táto hodnota bola v [1] použitá na vyhodnotenie úspešnosti metódy. Zisk určuje hodnotu konštanty pred komparátorom.

Metóda	TPR	FPR	vzdialenosť	zisk
Korelácia 30m	41/45	0/15	0.088	25
Korelácia 90m	41/45	0/15	0.088	25
DWT, (3,4,5)	40/45	0/15	0.111	15
CWT, (3,4,5)	40/45	1/15	0.129	30
CWT, (3,4)	40/45	1/15	0.129	30
Mediánový filter	39/45	2/15	0.189	25
DWT, (4,5,6)	37/45	1/15	0.190	10
Absolútna hodnota	38/45	2/15	0.205	15
Bez predspracovania	35/45	2/15	0.259	15
TEO	36/45	3/15	0.283	45

Tabuľka 1: Zhodnotenie úspešnosti detekčných metód

Ďalej je odporúčané [2] adaptívne prahovanie pre stále FPR za použitia mediánového filtra. Prah je počítaný ako normalizovaná energia ktorá by mala mať rozdelenie chi-kvadrát s  $2WT$  stupňami voľnosti v prípade neprítomnosti impulzu, kde  $W$  je šírka pásma prijatého signálu a  $T$  je vzorkovacia perióda. V prípade, že je impulz prítomný, rozdelenie je necentrálny chi-kvadrát s  $2WT$  stupňami voľnosti a necentralitou  $2\gamma$ . Kde  $\gamma$  je SNR prijatého signálu. Prah ( $\lambda$ ) udáva  $P_{fa}$  – pravdepodobnosť falošného alarmu a  $P_m$  – pravdepodobnosť nezisteného impulzu. Cieľom teda je stanoviť  $\lambda$  tak, aby sme dosiahli konštantnú hodnotu  $P_m$ , za predpokladu, že SNR môže byť odhadnuté. Ako uvádza [2] za predpokladu SNR = 20 dB (bežná hodnota pri systémoch detekujúcich výstreli [2]) má tento systém FPR = 2%, to je ďalej spracované druhým stupňom systému. Za predpokladu SNR = 15 dB však už FPR stúpa na 67%, čo je výrazne horšie a stúpala by tak energetická náročnosť celého systému vzhľadom na časté aktivovanie druhého stupňa.

[3] navrhuje detekciu impulzov pomocou pozorovania priebehu smerodajnej odchýlky. Tento systém pracuje s diskretným signálom a tak môže mať väčšiu spotrebu. Zvukové vzorky sa rozdelia do neprekrývajúcich sa blokov a prebehne odhad výkonu, výsledná sekvencia sa vynásobí okienkovou funkciou s vhodnou dĺžkou. Ďalej sa sekvencia znormalizuje a zistí sa jej smerodajná odchýlka, nastavením vhodného prahu (0,15; alebo adaptívneho podľa SNR medzi 0,1 a 0,18) smerodajnej odchýlky prebieha detekcia impulzného signálu. Táto metóda má pre SNR do -5dB hodnotu nezistených impulzov blízku 0% a hodnotu falošnej detekcie do 2,2%.

## 2.2 Rozpoznanie výstrelů

Po zvolení vhodnej metódy na detekciu impulzných signálov nasleduje fáza zistenia, či sa jedná o výstrel zo zbrane alebo iný impulzný signál. [2] navrhuje dvojstupňovú metódu, detekciu impulzných signálov a následné určenie, či sa jedná o výstrel. Požiadavka druhého stupňa vychádza z vysokého FPR prostej korelačnej metódy a z potreby zníženia spotreby zariadenia. Táto práca navrhuje použitie korelácie spolu s ôsmim rádom LPC (linear predictive coding) koeficientov a RBF (gaussian radial basis function) kernel pre support vector machine (SVM).

Prvým krokom po detekcii impulzného signálu je korelácia. Vybraný segment aj vzorový výstrel majú  $N$  vzoriek a sú normalizované na hodnoty 1 až -1 už pred koreláciou. Ďalej sú z vybraného segmentu získané LPC koeficienty ôsmeho rádu a prvých trinásť Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC). V uvedenej práci je na tieto úlohy použitý Matlab (Signal processing toolbox) a auditory toolbox od Internet Research Corporation. Na porovnávanie je tiež potrebná databáza týchto koeficientov zo vzorových výstrelů aj cudzích signálov. 8-násobná krížová validácia je ďalej použitá na naučenie a otestovanie SVM.

V uvedenej práci je použitá zvuková knižnica pozostávajúca zo zvuků nahraných za použitia štandardnej PC zvukovej karty na strelnici. Použité zbrane boli G3 a MP5 vo vzdialenostiach 100, 200 a 300 m. Vzorkovacia frekvencia 44,1 kHz a 8-bitová kvantizácia. Do knižnice boli zaradené aj impulzné zvuky ktoré neboli výstrely (tlesknutie, dvere,...), pozostáva z 332 výstrelů a 102 iných zvuků (databáza už nebola v čase písania tejto práce k dispozícii na uvedenej stránke).

Na vyhodnotenie výsledkov bola použitá 8-násobná krížová validácia zvlášť pre LPC a zvlášť pre MFCC. Korelácia bola testovaná iba za použitia prahu. Výsledky sú uvedené v tabuľkách 2 a 3, prebraných z [2]. Tabuľka 2 poskytuje výsledky pre lineárny kernel, Tabuľka 3 pre RBF kernel.

Metóda	Klasifikácia	TPR [%]	FPR [%]
Korelácia	prah	94.580	8.824
MFCC	SVM	97.321	50.000
LPC	SVM	99.702	11.458
LPC+korelácia	SVM	99.702	8.333

Tabuľka 2: Výsledky metód pre lineárny kernel

Metóda	TPR [%]	FPR [%]
MFCC	92.497	15.625
LPC	96.429	1.042
Korelácia	97.917	10.417
LPC+korelácia	97.619	~0

Tabuľka 3: Výsledky pre RBF kernel

Z tabuľky vyplýva, že za použitia RBF kernelu pre kombináciu LPC a korelácie so vzorovým výstrelom dostávame vysoké TPR (97,619%) a zanedbateľné FPR (0 zo 102).

V ďalšej práci [4] sa taktiež odporúča použitie korelácie, ktorá je porovnávaná s LPC, MFCC a parametrom impulzivity. V prostredí bez šumu vychádza LPC ako metóda ktorá je schopná klasifikovať 22 vzoriek v štyroch kategóriách (výstrel, prasknutie balóna, tlesknutie, reč) so 100% presnosťou, tieto vlastnosti sa však s rastúcim SNR zhoršujú. Záverom sa odporúča pred samotnou koreláciou použiť metódy na zníženie šumu.

Práca [3] pojednáva o detekcii a triedení impulzných zvukov rôznych vopred daných kategórií. Techniky detekcie boli spomenuté v podkapitole 1.2, táto časť sa bude zaoberať analýzou signálu a samotným rozpoznávaním jednotlivých kategórií zvukov. Databáza zvukov použitá v tejto práci nieje dostupná, pozostáva však z impulzných

zvukov ako sú explózie, krik, rozbíjanie skla, štekание psa, výstreli a iné, je doplnená aj niekoľkými neimpulznými zvukmi ako zvuk motora, hudba, detský hlas a iné hluky z prostredia. Vzorkovacia frekvencia je 44,1 kHz a je použitá 16-bitová kvantizácia. Databáza je rozčlenená na tri celky, každý obsahuje iný počet kategórií zvukov (3, 6, 10) na účely porovnania algoritmov z hľadiska schopnosti rozpoznávať rôzne množstvo kategórií.

Podľa [3] ideálne rysy signálu slúžiace na klasifikáciu by mali mať čo najväčšie rozdieli medzi triedami avšak čo najmenšie vo vnútri tried, mali by byť odolné voči šumu a nemali by byť medzi sebou korelované. Kladie sa dôraz aj na vhodné zvolenie veľkosti a počtu vybraných rysov triedy. V práci sa používa normalizovaná databáza rysov, vytvorená extrakciou D-dimenzionálneho vektoru z každého pozorovania, čo predstavuje maticu  $D \times K$  pre  $K$  pozorovaní. Tie sú potom spracované na vektor stredných hodnôt  $\mu$  a kovariančnú maticu  $C$ . Tieto matice sú získané nasledovne:

$$\mu_d = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \vec{f}_k(d), \quad (2)$$

$$c_{ij} = \frac{1}{K-1} \left( \sum_{k=1}^K (\vec{f}_k(i) - \mu_i)(\vec{f}_k(j) - \mu_j) \right). \quad (3)$$

Ďalším krokom je optimalizácia parametrov, obmedzenie veľkosti databázy a výber iba tých najkvalitnejších. Na toto sa môžu použiť protokoly ako Sequential Forward Selection (SFS) rekurzia, Viterbiho algoritmus, alebo sub-optimálny Add-on algoritmus, prípadne opak SFS, Sequential Backward Selection. Menej zložitú metódu predstavuje Fisher Discrimination Ratio (FDR), prípadne Multimodal Overlap Measure. Tieto metódy používajú porovnávanie prekrytia funkcie hustoty pravdepodobnosti.

$$FDR = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} (\mu_i - \mu_j)^2}{\sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i^2}. \quad (4)$$

Je odporúčaných niekoľko metód na získanie parametrov signálu. Prvou spomínanou, je rozčlenenie vstupného signálu na okná o určitej dĺžke, napríklad  $N = 512, 1024, 2048 \dots$ . Ktoré sa vzájomne prekrývajú  $N_{ov} = 1/4$  alebo  $1/8$ , na tieto je aplikované modifikované Hanningovo okno. Tieto časové úseky sú následne transformované pomocou Fourierovej transformácie a rozčlenené do rovnomerných pásiem o počte 5, 10, 20 alebo 50, prípadne nerovnomerne rozčlenené (Barkov spektrogram). Získané vektory potom môžu byť buď spojené do väčších úsekov (napríklad po jednej sekunde) alebo v prípadoch kedy je k dispozícii menej pamäte spracúvané samostatne.

Medzi ďalšie odporúčané parametre patria LPC koeficienty (pre spracovanie reči koeficienty ôsmeho až dvanásteho rádu, na impulzné signály medzi pätnásť a dvadsať), Cepstral koeficienty, prípadne Mel-frequency cepstral koeficienty.

V [3] rozdeľujú klasifikačné procesy na neparametrické, kedy sa používa konkrétne meranie (napríklad histogram) rysov funkcie hustoty pravdepodobnosti. Pri parametrickej klasifikácii je najskôr zvolený model distribúcie, napríklad normálne rozloženie, každá trieda je potom reprezentovaná jej parametrami naučenými v

trénovacej fáze. Neparametrické metódy sú v praxi častejšie volené vzhľadom na ich nižšiu komplexitu.

Ako prvý je opísaný Bayesiánsky klasifikátor. Predpokladá sa jednorozmerný parameter signálu ktorý má byť priradení jednej z tried. Rozhodovacie pravidlo predstavuje maximálnu a-posteriori pravdepodobnosť. Ďalej je uvedená aj možnosť D-rozmerného vektoru parametrov. Za predpokladu známosti a-priori pravdepodobnosti výskytu jednotlivých tried, môže byť dosiahnutá spoľahlivosť ešte lepšia. [3] ďalej uvádza tabuľku porovnávajúcu dosiahnuté výsledky pre rôzne použité metódy extrakcie parametrov signálu s prípadnou transformáciou a redukciou (šírka okna, počet pásiem...) pri troch triedach zvuku, maximálna dosiahnutá úspešnosť predstavuje 99,57 %. V prípade kedy sa nepoužíva transformácia a iba s piatimi frekvenčnými pásmami sa dosahuje úspešnosť 99,39 %. Podobné výsledky sú dosiahnuté aj za použitia Barkovho spektrogramu (99,83%), zato použitie LPC koeficientov prináša iba 90,59% (bez redukcie) pre rád 15 a 97,96% pre rád 50. Cepstral koeficienty prinášajú presnosť 99,71% pre 20 a 99,83% pre 50 iterácií bez redukcie, MFCC poskytuje presnosť 99,94% pre 40 koeficientov.

## 2.3 Dostupné zariadenia

Táto kapitola opisuje realizované moduly na detekciu prípadne lokalizáciu výstrelů.

Prvý prototyp bol vytvorený spoločnosťou BBN Technologies s financovaním od DARPA [5], je určený najmä na vojenské ale aj iné bezpečnostné účely. Boli vyvinuté dve varianty, prvá „fixná“ používala dva nepohyblivé mikrofóny komunikujúce bezdrôtovo alebo po vedení so spracovacím a zobrazovacím strediskom. Druhá, „nositeľná“ varianta je zostavená z ľubovoľného počtu jednotiek zdieľajúcich dáta bezdrôtovo, v súčasnej verzii (1997) ide o mikrofónové polia montované na helmách s vlastnou spracovacou a zobrazovacou jednotkou.

Systém pozostáva z detailného parametrického modelu rázovej vlny a samotného zvuku výstrelu a siete dvoch mikrofónových polí alebo šiestich všesmerových mikrofónov. Z toho je získaná trajektória strely, rýchlosť a kaliber, v prípade prítomnosti zvuku výstrelu je získaný aj odhad polohy strelca. Kľúčovým je pre systém používanie nízkych frekvencií (pod 10 kHz), čo umožňuje lacné a energeticky nenáročné spracovanie, a vzhľadom na inverznú proporciu medzi frekvenciou a útlmom aj vyšší dosah. Základom však je model rázovej vlny nadzvukového projektilu odvodený z fyzikálnych princípů. Tento systém je známy ako „Bullet Ears“.

Na rozšírené požiadavky invázie v Iraku opäť reagovala BBN. Nový systém nadväzujúci na Bullet Ears, zvaný Boomerang (neskôr rozšírený na verzie II a III) bol prispôsobený na ťažké podmienky mestského prostredia s odrazmi a hlučným okolím, tento systém bol vyvinutý tak, aby ignoroval streľbu spojeneckých jednotiek. Mobilná jednotka navrhnutá na nosenie vojakmi má názov Boomerang Warrior-X, táto jednotka má deklarovanú výdrž maximálne 12 hodín. Keďže tento systém je spravovaný súkromnou spoločnosťou bez verejnej publikácie detaily nie sú známe. Spoločnosť tvrdí, že tretia verzia Boomerangu má maximálne jeden falošný alarm za 1000 hodín. [6]

Ďalším zariadením je Shotspotter vyrábaný firmou SST, Inc [7]. Zariadenie je určené pre civilné bezpečnostné zločky. Je umiestňované do miest s vysokým počtom



výstrelom a po detekcii výstrelu (s rýchlosťou projektilu nadzvukovou aj nižšou ako rýchlosť zvuku) odosiela signál polícií. Systém potrebuje 10 – 12 senzorov na strechách alebo pouličnom osvetlení na štvorcovú míľu. Zariadenie reaguje v momente keď výstrel zachytia 3 a viac senzorov, tieto potom spracujú pozíciu a pokúsia sa určiť typ zbrane, následne záznam môže byť poslaný analytikovi na posúdenie, či sa jedná o streľbu, ten záznam prepošle polícií. Vzhľadom k tomu, že aj tento produkt je v súkromnom vlastníctve a používaný na komerčné účely, nieje možné dostať sa k detailnejšiemu opisu zariadenia prípadne používaných algoritmov. Údajná úspešnosť zariadenia sa rôzni, firma pochopiteľne sľubuje vysokú spoľahlivosť. Na druhej strane je zariadenie obviňované z vysokých falošných poplachov, prípadne nedetekovaných striel, podľa polície v štáte New York je možné dokázať iba 7% nahlásených striel.

Zariadenie Shotpoint je komerčne dostupné [8], avšak jeho účelom nieje kontaktovať políciu ale poskytnúť informácie používateľovi, s tým, že môžu byť aj priebežne ukladané na web stránku alebo zdieľané s inými používateľmi. Pozostáva zo 4 mikrofónov, má rozmery 16 cm x 13 cm, bunky majú byť rozostavené v rozmedzí 50 – 100 m. Bunky medzi sebou spolupracujú a produkt sľubuje určenie polohy streľca, trajektóriu strely, rýchlosť a kaliber. Zaručovaná je 95% úspešnosť detekcie pod jednu sekundu. Množstvo planých poplachov nieje uvedené.

QinetiQ North America vyvinul systém na detekciu a lokalizáciu streľby určený na individuálne nosenie vojakmi, systém je známy ako Swats (Shoulder-worn acoustic targeting system). Firma ďalej vyvinula aj systémy stacionárne FSS (Fixed site system) a určené na montáž na vozidlá VMS (Vehicle Mounted System). Súčasná výdrž Swats je maximálne 14 hodín. [9]

Ďalším systémom je AAI Textron PDCue, určený na montáž na vozidlá. Pozostáva zo 4 anténnych sústav pokrývajúcich 360°, poskytuje detekciu aj lokalizáciu streľby, maximálny dosah 1200 m. [9]

Acoem-Metravib poskytla v polovici roku 2012 produkt na detekciu a lokalizáciu streľby Pearl (Personal Equipment Add-on for Reactive Localization). Systém je schopný detekcie projektilov ráže 5.45 mm až 20 mm. Úspešnosť detekcie je minimálne 95% do jednej sekundy. Spotreba je pod 2W a výdrž minimálne 12 hodín. Firma ďalej ponúka systémy na pevnú montáž alebo montáž na vozidlá Pilarw, ktorý má detekovať okrem malých strelných zbraní aj raketomety, mínomety a protitankové rakety. [9]

Ďalším výrobcom je Microflown Avisa so systémom AVS (Acoustic Vector sensors) na detekciu a lokalizáciu streľby, artilérie, lietadiel a vozidiel. Systém používa tri ortogonálne umiestnené senzory. Firma momentálne vyvíja systém schopný operovať na vozidlách do rýchlosti 80 km/h odolný voči ruchu spôsobenému motormi. [9]

Pre Britské ministerstvo obrany vytvorila firma Ultra Electronics lokalizátor streľby umiestnený na hlaveň zbrane „Sniper Egg“ na detekciu kalibrov 5.56 mm až 12.7 mm. Rozsah je 30 m až 1,2 km, pravdepodobnosť úspešnej detekcie má byť až 90% a „nízka“ pravdepodobnosť falošnej detekcie. Systém je vode odolný, napájaný dvoma AA batériami a dokáže operovať maximálne 7 hodín. [9]

Ďalším americkým výrobkom je PinPoint firmy Combham v spolupráci s BioMimetic Systems. Vytvorené sú dve verzie, jedna pre peších vojakov a druhá na montáž na vozidlá prípadne fixné stanoviská. Verzia pre pešiakov napájaná dvoma AA batériami so spotrebou 1 W umožňuje používanie v rozsahu 10 – 12 hodín. Systém

používa zmiešané analógovo-digitálne spracovanie so spracovaním podmieneným udalosťou (event-based processing). Údaje o presnosti niesu firmou poskytované. [9]

Rheinmetall Defence Electronics vyvinul ASLS (Acoustic Shooter Locating System) určený na montáž na vozidlá. Systém používa 8 mikrofónov, spotreba systému je 15 W s napájaním medzi 10 V a 3V. [9]

V súčasnosti je vo výskume nový systém na detekciu a lokalizáciu streľby ktorý má kombinovať akustické a obrazové signály na detekciu a lokalizáciu streľby. Projekt má na starosti Army Research Lab a jej kontraktor Logos Technologies.

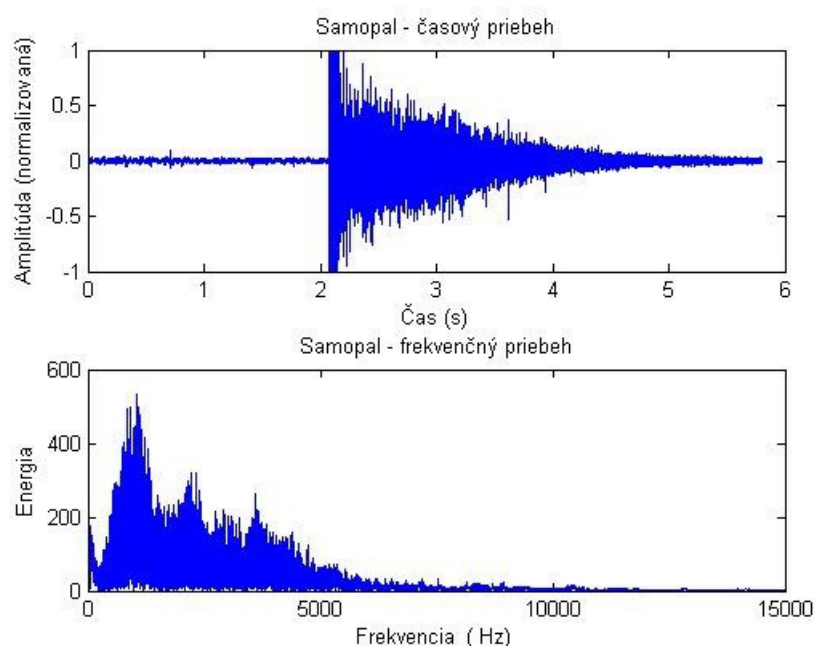
## 3 NÁVRH SYSTÉMU

Kapitola zhŕňa zvolený pracovný postup, testované metódy a výsledky.

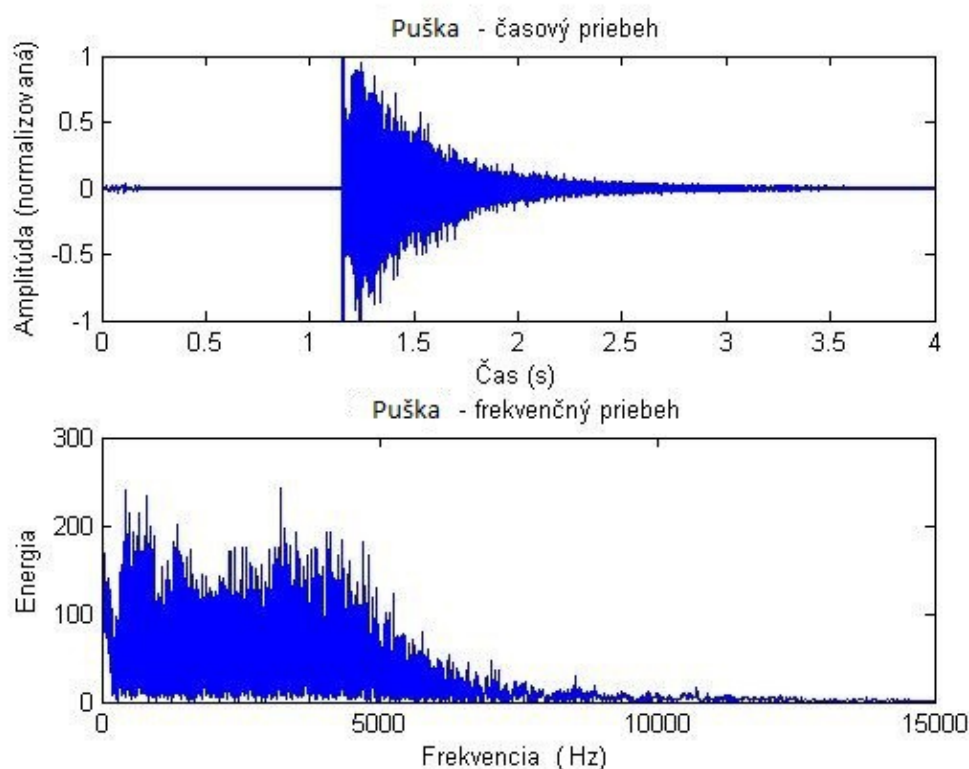
### 3.1 Databáza zvukov

Dostupná databáza nahrávok výstrelů a iných zvuků je obmedzená a jej účelom v tejto práci je zistiť použiteľnosť vybranej metódy. Jednotlivé nahrávky obsahujú aj hlasový popis situácie a môžu obsahovať aj niekoľko impulzných zvuků rovnakej kategórie (napríklad 3 výstreli v jednej nahrávke).

Dodané nahrávky boli rozdelené do piatich kategórií, prvá obsahuje 26 výstrelů zo samopalů, druhá 4 výstreli z loveckej pušky, tretia 25 záznamů práce s drevom (lámanie, sekanie ...), štvrtá 13 záznamů štekania rôznych psov a posledná pozostáva z 9 nahrávok iných zvuků (napr. Motor štvorkolky, prelietavajúce lietadlo, šplechot vody...). Dĺžka záznamů je rôzna, od 15 sekúnd až po 2 minúty. Nahrávky boli vzorkované frekvenciou 44 100 Hz a kvantizované na 16 bitů. Obrázok 1 ukazuje úsek záznamu výstrelu zo samopalů a jeho spektrum, obrázok 2 ukazuje pre porovnanie spektrum výstrelu z pušky. Neskôr boli opatrené aj nahrávky slonů. Nahrávanie prebiehalo v troch rôznych ZOO z väčšej časti vo vnútorných priestoroch, zvuky okolia teda nie sú prítomné (až na niekoľko prípadů, kedy bol v miestnosti dekoratívny vodopád), zvuky budú ale poznamenané odrazmi od stien v miestnosti. Nahrávané boli africké aj indické slony, pričom nahrávky obsahujú okrem trúbenia aj iné zvuky ktoré slony vydávali, celkovo sa jednalo o 3 africké slonice a 4 indické slonice.



Obrázok 1: Výstrel zo samopalů a jeho spektrum

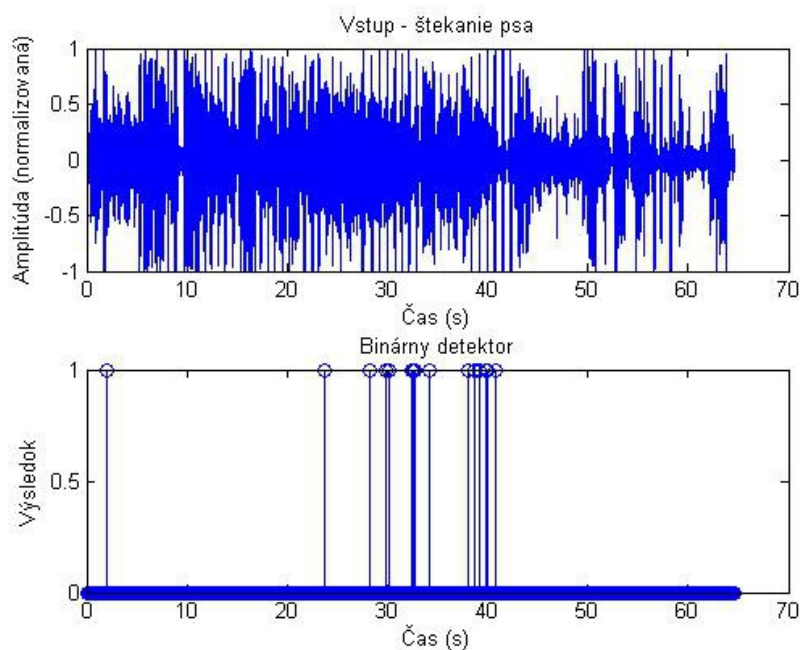


Obrázok 2: Výstrel z pušky a jeho spektrum

## 3.2 Pracovná metóda

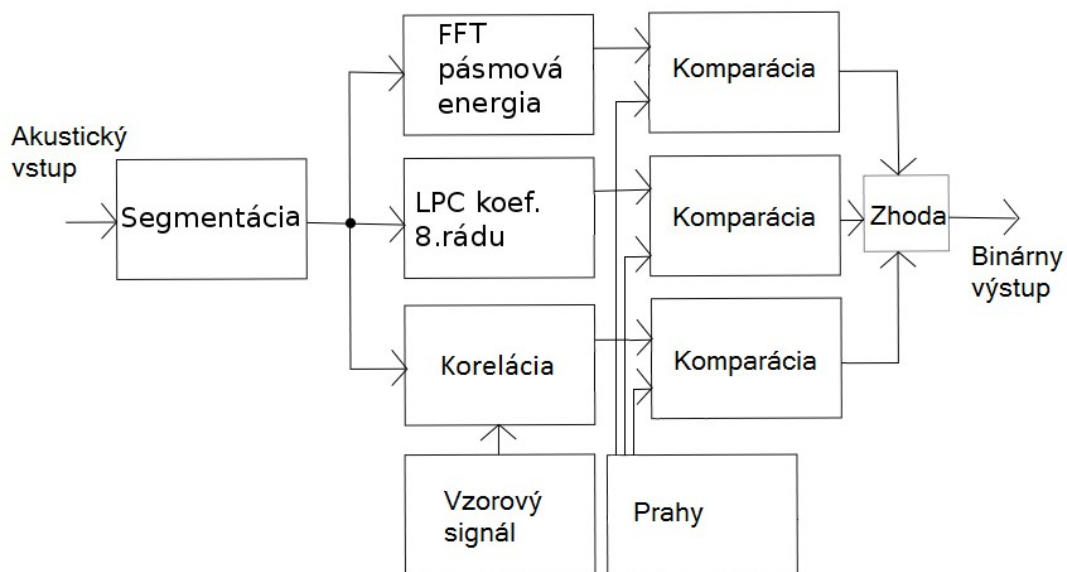
Po preštudovaní uverejnených prác je potrebné vybrať jednoduchý, nenáročný a spoľahlivý systém schopný rozlíšiť medzi zvukom streľby a inými impulznými zvukmi z okolitého prostredia.

Na základe [2] a niekoľkých pokusov bola za základ systému zvolená korelácia a LPC koeficienty 8. rádu. Vstupný signál je rozdelený na úseky dĺžky  $N = 1024$  vzoriek s prekryvaním  $N_{OV} = 1/4$ . Pozorovanie a porovnávanie zvukov streľby a iných zvukov odhalilo, že najvhodnejšie na rozlišovanie sú koeficienty 3, 4 a 6. Systém pracuje tak, že úseky sú postupne otestované podľa rôznych kritérií a v prípade, že sú všetky kritériá splnené, je úsek označený za obsahujúci výstrel. Ako prvé, sú úseky korelované so vzorovým výstrelom dĺžky približne 23 ms (1024 vzoriek), na základe pozorovania bol prah korelácie nastavený na 60. Ďalej sú z úsekov extrahované LPC koeficienty ôsmeho rádu a je zistené, či ležia v požadovanom rozmedzí, ako bolo spomenuté vyššie, používajú sa iba koeficienty 3, 4 a 6 keďže tie najlepšie odlišujú zvuk streľby od iných zvukov. Tieto dve kritériá, na rozdiel od výsledkov v uvedenej literatúre, však ešte stále dostatočne nerozlišovali medzi streľbou a zvyškom zvukov, obrázok 3 ukazuje výsledok použitia algoritmu na záznam psieho štekania. Porovnanie falošných alarmov pre rôzny počet vyhodnocovacích kritérií je uvedené v kapitole výsledky a vyhodnotenie.



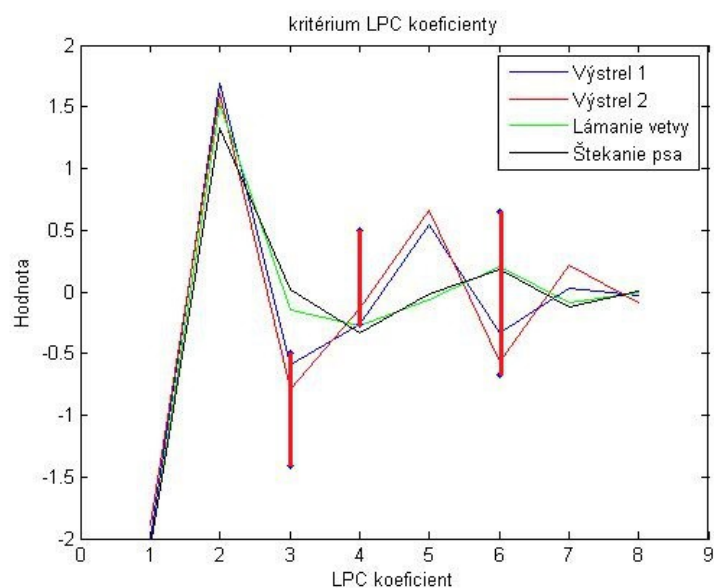
Obrázok 3: Záznam štekani a výsledok detekcie

Hoci patrí výsledok na obrázku 3 k najhorším získaným a neodráža skutočné schopnosti algoritmu, vhodne ilustruje jeho neschopnosť vysporiadať sa s niektorými situáciami a nutnosť pridania ďalšieho kritéria. Na základe preštudovaných prác a zložitosti metód bolo zvolené porovnávanie energie v spektrálnych pásmach. [3] odporúča niekoľko variánt dĺžky okna, prekryvania okien, počtu spektrálnych pásiem a ich šírku. Podľa [1] leží významná časť energie výstrelu do 4 kHz, na základe [3] bola teda zvolená spodná hranica šírky spektra, 15 kHz na porovnávanie energie a päť energetických pásiem, teda každé po 3 kHz. Na odfiltrovanie zvyšných falošných detekcií postačuje porovnávať vo dvoch energetických pásmach, zvolené bolo pásmo druhé, 3000 Hz – 6000 Hz, pásmo tretie, 6000 Hz – 9000 Hz a štvrté pásmo od 9000 Hz do 12 000 Hz, obrázok 4 názorne ilustruje blokovú schému systému. Korelácia, LPC koeficienty a pásmová filtrácia budú opísané v nasledujúcich kapitolách.

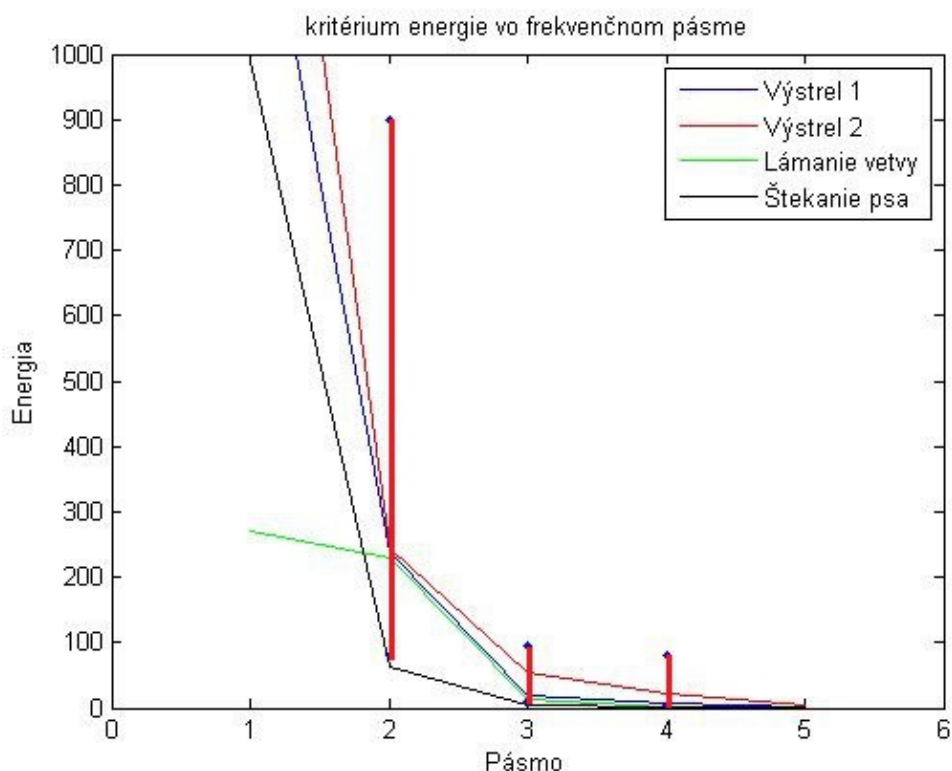


Obrázok 4: Bloková schéma

Vstupom vytvoreného programu je celá zvuková nahrávka, výstupom je potom binárny detektor, postupnosť bitov reprezentujúcich každý vstupný rámec dlhý 23ms, vyjadrujúce prítomnosť alebo neprítomnosť výstrelu. Obrázky 4 a 5 graficky znázorňujú kritériá na LPC koeficienty a na požadovanú energiu vo vybraných pásmach. V kapitole výsledky a vyhodnotenie je tabuľka porovnávajúca úspešnosť zvolenej metódy.



Obrázok 5: Kritérium LPC



Obrázok 6: Kritérium energie

### 3.3 Korelácia

Korelácia je funkcia, ktorá udáva mieru podobnosti medzi dvoma signálmi v závislosti od ich vzájomného posunutia. Táto funkcia sa používa na hľadanie známeho vzoru v dlhšom signále. Využitie má napríklad v oblastiach signálového spracovania, rozpoznávania vzorov alebo kryptoanalýzy.

Korelácia je pre komplexný diskretný signál dĺžky  $N$  definovaná vzťahom (5):

$$corr(x, y)[m] = \sum_{n=0}^N x^*[n] \cdot y[n+m] \quad (5)$$

kde  $m$  je vzájomné posunutie signálov,  $n$  udáva aktuálnu vzorku z  $N$  vzoriek a premenné  $x$  a  $y$ ,  $x^*$  je potom vektor komplexne združený k  $x$ . Korelácia môže byť vypočítaná aj vo frekvenčnej oblasti, vzorec pre jej výpočet potom môže naberať dvoch rôznych podôb.

Pre komplexný signál dĺžky  $N$  je korelácia daná vzťahmi (6) a (7):

$$corr(x, y) = \text{ifft}[\text{fft}(x_{\text{zeros}}[n]) \cdot \text{fft}(y_{\text{zeros}}[-n])] \quad (6)$$

$$corr(x, y) = \text{ifft}[\text{fft}(x_{\text{zeros}}[n]) \cdot (\text{fft}(y_{\text{zeros}}[n]))^*] \quad (7)$$

kde  $\text{fft}$  a  $\text{ifft}$  predstavujú fourierovu transformáciu a inverznú fourierovu transformáciu,  $x_{\text{zeros}}$  a  $y_{\text{zeros}}$  sú vektory  $x$  a  $y$  doplnené  $N$  nulami,  $y_{\text{zeros}}[-n]$  je časovo

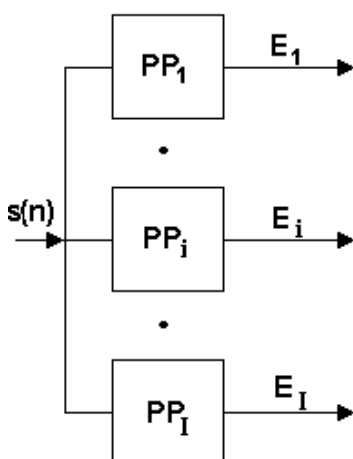
reverzovaný oproti  $y_{\text{zeros}}$ , v (4) je potom použitý komplexne združený výstup Fourierovej transformácie. V prípade výpočtu korelácie vo frekvenčnej oblasti je násobenie realizované ako násobenie jednotlivých koeficientov Fourierovej transformácie.

Z hľadiska výpočetnej náročnosti je pre všetkých  $2N$  posunutí (v prípade dvoch rovnako dlhých signálov) pri použití (5) potrebné vykonať  $2N \cdot N$  súčtov aj súčinov. V prípade (6) a (7) je to potom iba  $2N$  súčinov.

### 3.4 Pásmová filtrácia

Pásmovou filtráciou sa zaoberá najmä práca [3], kde sú z hľadiska úspešnej detekcie porovnávané rôzne nastavenia dĺžky okna, prekryvanie alebo množstvo pásiem. Metóda pásmovej filtrácie použitá v tejto práci je založená práve na [3].

V systémoch na rozpoznávanie reči sa zvykne merať energia v pevne nastavených frekvenčných pásmach. Bloková schéma analýzy rečového signálu založenej na pásmovej filtrácii je na obrázku 6. (prebrané a modifikované z [10]).



Obrázok 6: Bloková schéma banky filtrov

Výsledky analýzy založenej na pásmovej filtrácii závisia od mnohých parametrov, ktorých optimálna hodnota sa líši od aplikácie a charakteru vstupného signálu. Výstupy filtrov môžu byť logaritmované a prípadne transformované kosínovou transformáciou ktorá má kompenzovať vzájomnú koreláciu výstupných úrovní jednotlivých kanálov [10]. Významným faktorom je aj počet pásiem, obvyklý počet v aplikáciách na rozpoznávanie reči je 8-20, pre prenos reči pomocou vokodéru potom 10-32 pásiem [10], práca [3] porovnáva v aplikácii na triedenie impulzných zvukov počet pásiem 5, 10, 20 a 50. Ďalšou možnosťou je nelineárna distribúcia pásiem, napríklad logaritmická, Barkov spektrogram, ktorá simuluje schopnosti a možnosti ľudského ucha.



Možnou cestou je krátkodobá Fourierova transformácia počítaná pre za sebou nasledujúce okná prednastavenej dĺžky, v tomto prípade je možné použiť rôzne okná, či už jednoduché obdĺžnikové, Hannovo, Hammingovo alebo iné, rozhodujúca je aj dĺžka signálu a prekrytie okien. Výsledkom tejto transformácie je potom spektrum pozostávajúce z  $N/2 + 1$  hodnôt reprezentujúcich frekvencie 0 až  $f_s/2$  ( $f_s$  je vzorkovacia frekvencia). Tieto hodnoty potom môžu byť zoskupené do požadovaného počtu pásiem a po umocnení na druhú sčítané.

### 3.5 Lineárna predikcia

Lineárna predikcia je nástroj veľmi často používaný v spracovaní reči a objavuje sa aj pri spracovaní iných zvukov. Pri spracovaní reči sú najčastejšie používané LPC (linear predictive coding) koeficienty ôsmeho a dvanásteho rádu (tj. 8 alebo 12 koeficientov) [3]. Táto metóda patrí k časovo-frekvenčným analýzám keďže na základe koeficientov je možné predpovedať  $n$ -tú vzorku, koeficienty taktiež nesú informácie o spektre.

Predpoveď  $n$ -tej vzorky je možná pomocou vzorca (8) uverejneného v [10]:

$$\hat{s}(n) = \sum_{m=1}^M a_m s(n-m), \quad (8)$$

kde  $a_m$  sú predikčné (LPC) koeficienty a  $M$  udáva rád prediktoru (počet koeficientov). Tento vzťah predstavuje zjednodušený tzv. pólový model.

LPC koeficienty môžu byť určované za účelom odhadu nasledujúcej vzorky alebo kvôli odhadu spektra, keďže LPC koeficienty poskytujú informáciu o spektre, na jej základe môže byť spektrum zrekonštruované, pri nižšom počte koeficientov je spektrum výrazne vyhladené, s pribúdajúcim počtom sa v spektre prejavujú väčšie detaily. Pri výpočte koeficientov sa používa autokorelačná matica uvedená vo vzťahu (9):

$$\begin{pmatrix} R(0) & R(1) & R(2) & \dots & R(M-1) \\ R(1) & R(0) & R(1) & \dots & R(M-2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ R(M-1) & R(M-2) & R(M-3) & \dots & R(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ R(M) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Je to tzv. Toeplitzova matica, keďže je symetrická a jej riadky môžu byť získané cyklickým posuvom prvého riadku [10]. Autokorelačná matica obsahuje výsledky autokorelácie vstupného vektora, pričom autokorelácia je v podstate korelácia (opísaná vyššie) signálu samého so sebou, z toho vyplýva, že pre rovnaký posun na obe strany získavame rovnaký výsledok. Ako je vidieť, pri výpočte LPC koeficientov je potrebné vypočítať autokoreláciu iba pre  $M$  posuvov.

Samotný výpočet LPC koeficientov potom prebieha iteračným Levinson-Durbinovým algoritmom, postup je naznačený nižšie.

Počiatková hodnota  $E(0)$  je daná vzťahom (10).

$$E(0) = R(0), \quad (10)$$

Teda prvé číslo v chybovom vektore je rovné autokorelácií pre nulové posunutie. Pre výpočet samotných koeficientov nasleduje iteračný postup pre  $m$  od 1 do  $M$ , kde  $M$  udáva rád koeficientov.

$$1.) \quad a(0, m-1) = 1, \quad (11)$$

$$2.) \quad k(m) = - \left[ \sum_{s=0}^{m-1} a(s, m-1) \cdot R(m-s) \right] / E(m-1), \quad (12)$$

$$3.) \quad a(m, m) = k(m), \quad (13)$$

V ďalšom kroku nasleduje iteračná subrutina pre  $s$  od 1 do  $m-1$ .

$$4.) \quad a(s, m) = a(s, m-1) + k(m) \cdot a(m-s, m-1), \quad (14)$$

$$5.) \quad E(m) = (1 - k(m)^2) \cdot E(m-1). \quad (15)$$

Predikčné koeficienty tu nadobúdajú dva indexy, druhý index určuje počet koeficientov daného prediktora. Je vidieť, že ako prvé sa určí prediktor s jedným koeficientom  $a_{1,1} = a_1$ , potom prediktor 2. rádu s dvoma koeficientami  $a_{1,2}, a_{2,2}$  až sa rád prediktora zvyšuje na požadované  $M$  s koeficientami  $a_{1,M}, a_{2,M}, \dots, a_{M,M}$ . Po dokončení výpočtov sa prechádza na jedno indexový tvar koeficientov:

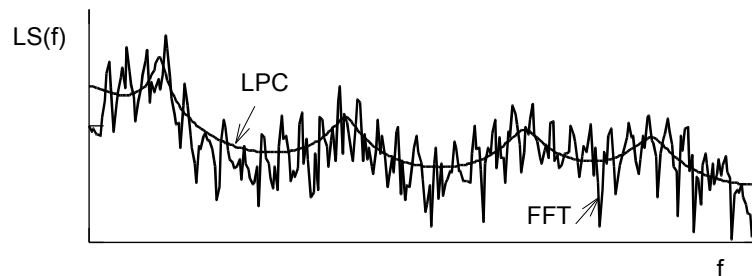
$$a_{1,M}, a_{2,M}, \dots, a_{M,M} \Rightarrow a_1, a_2, \dots, a_M,$$

Pri výpočtoch je použitá aj pomocná premenná  $k(m)$  ktorá je v podstate totožná s koeficientom  $a(m, m)$ , v tomto prípade slúži na sprehládnenie výpočtov, nadobúda tiež význam koeficientov odrazu.

Ako už bolo spomínané, na základe LPC koeficientov je možné získať LPC spektrum signálu, tento výpočet vychádza zo Z-transformácie, uvedený je vo vzorci 16.

$$S(f) = \left| \frac{1}{1 - \sum_m a_m z^{-m}} \right|_{z = \exp(j2\pi f / f_{vc})}^2. \quad (16)$$

Obrázok 7 z [10] porovnáva spektrum vypočítané pomocou Fourierovej transformácie a spektrum získané pomocou LPC koeficientov.



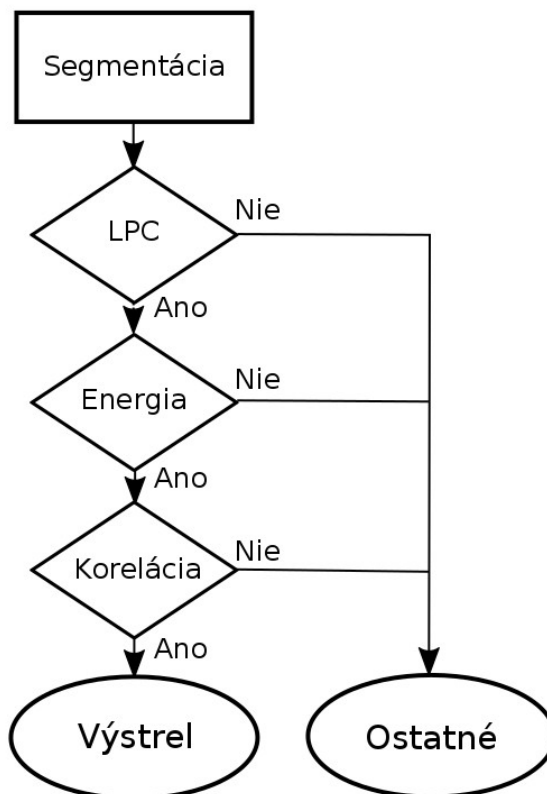
Obrázok 7: LPC a FFT spektrum samohlásky "a"

## 4 IMPLEMENTÁCIA

Táto kapitola popisuje proces implementácie zvoleného postupu do signálového procesora, zvolený bol procesor TMS320C6713 s plávajúcou rádovou čiarkou z dôvodu dostupnosti. Signálový procesor je umiestnený na tzv. starter kite na ktorom sú spolu s ním umiestnené aj ďalšie periférie umožňujúce jednoduchšie testovanie celého systému.

V celom zdrojovom kóde bol kladený dôraz na používanie existujúcich knižníc funkcií ako pri nastavovaní registrov tak aj pri samotnom spracovaní signálov. Dôvodom bola najmä efektivita programu a požiadavka spracovania v reálnom čase s prihliadnutím na spotrebu, teda čo najmenšie nároky na procesor a vyššie požiadavky na optimalizáciu kódu.

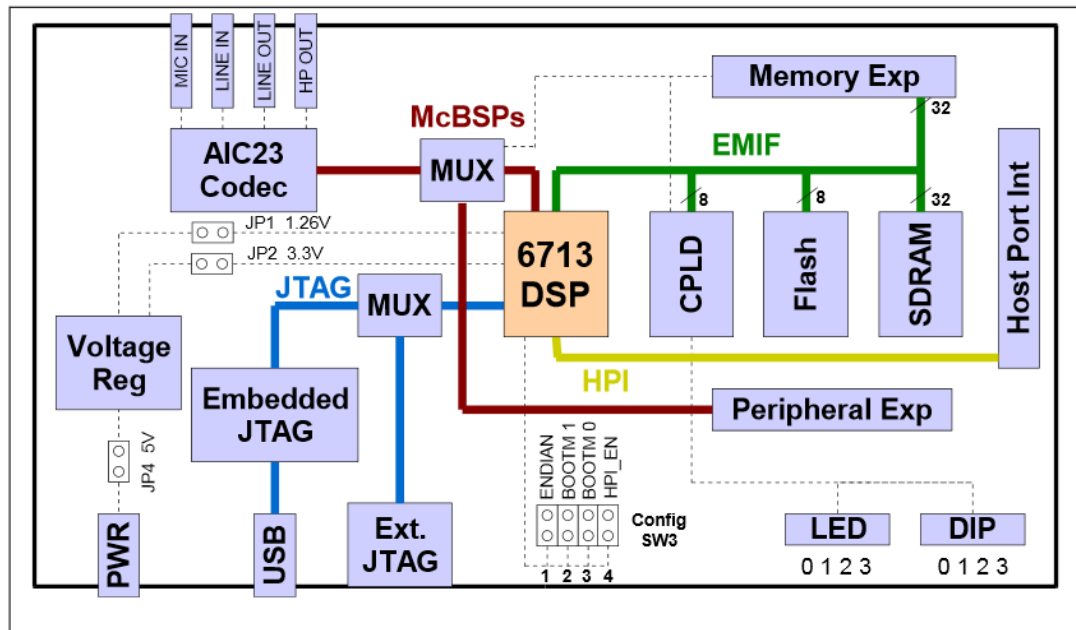
Postup používaný pri simulácii sa od toho pri implementácii mierne líši, v prvom rade boli pri simulácii používané celé nahrávky ktoré boli následne segmentované a spracované, pri implementácii je zvuk snímaný a segmentovaný v reálnom čase a hneď sa aj spracúva. Pri simulácii boli taktiež počítané všetky parametre signálu paralelne, realizácia na signálovom procesore ale počíta každý parameter postupne a iba za podmienky, že predchádzajúce kritérium bolo splnené. Obrázok 8 ukazuje vývojový diagram tohto postupu.



Obrázok 8: Vývojový diagram

## 4.1 TMS320C6713 Starter kit

Ako bolo spomenuté vyššie, zvolený postup bude otestovaný na signálovom procesore TMS320C6713, táto kapitola má za úlohu poskytnúť bližšie informácie o procesore, ďalšie detaily sú dostupné v datasheete [11] alebo technickej dokumentácii [12]. Bloková schéma kitu je na obrázku 10 (prebraté z [12]).



Obrázok 9: Bloková schéma C6713 [12]

Procesor pracuje na frekvencii 225 MHz vykonávajúc až 1800 miliónov inštrukcií za sekundu. Ako bude spomínané nižšie, doska disponuje 24-bitovým kodekom AIC23 so štyrmi audio jackmi pre mikrofón, sluchátka, line input a line output. K dispozícii je sú pamäte SDRAM (16 MB) a flash (512 KB), kompletne mapovanie pamäte je k dispozícii v [12], štyri LED diódy a štyri DIP tlačítka. Pomocou prepínačov je možné voliť medzi niekoľkými bootovacími možnosťami, napríklad voľba medzi Little endian a Big endian, 32-bitový alebo 16-bitový EMIF boot a podobne. Pripojenie je možné pomocou embedded JTAG emulátoru s USB vstupom, celá doska je napájaná napätím 5V. Využívaním je aj DSP/BIOS real-time kernel.

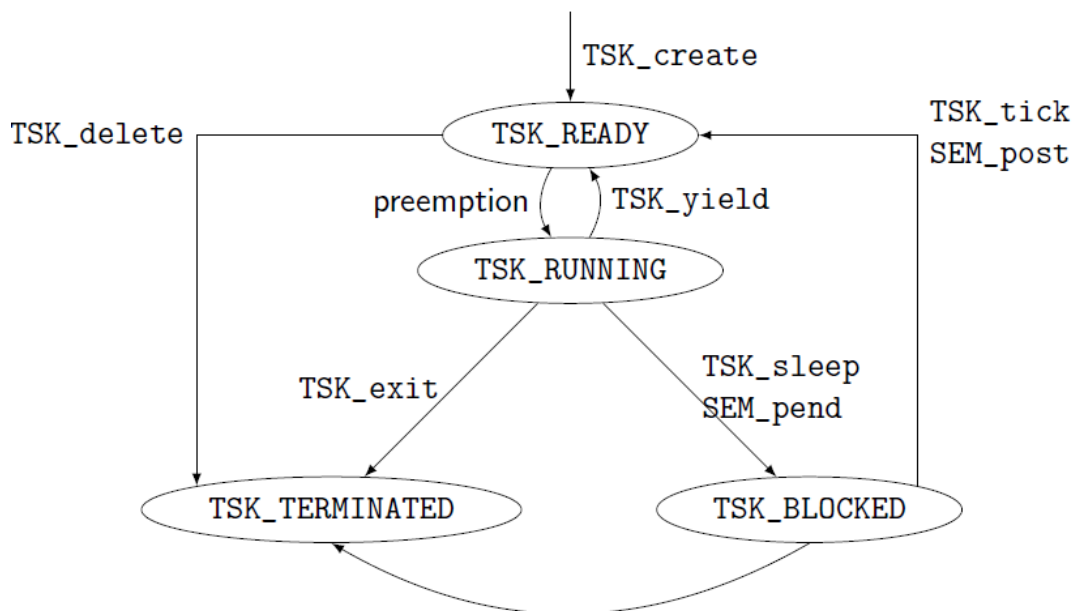
Súčasťou dosky je aj CPLD (programovateľná logika) toto zabezpečuje niektoré funkcie dosky ako sú napríklad jednoduché logické operácie, zoskupuje reset signály z tlačítka a napájania a generuje globálny reset. Táto súčiastka má niekoľko nastaviteľných registrov, ich detailný popis je uvedený v [12].

## 4.2 DSP/BIOS

Spracovanie signálu v reálnom čase (vstupná bitová rýchlosť je 705,6 kbit/s) vyžaduje efektívne využitie procesorového času. V tejto práci je využívaný operačný systém DSP/BIOS vyvíjaný firmou Texas Instruments, jedná sa o systém reálneho času (RTOS – Real Time Operating System).

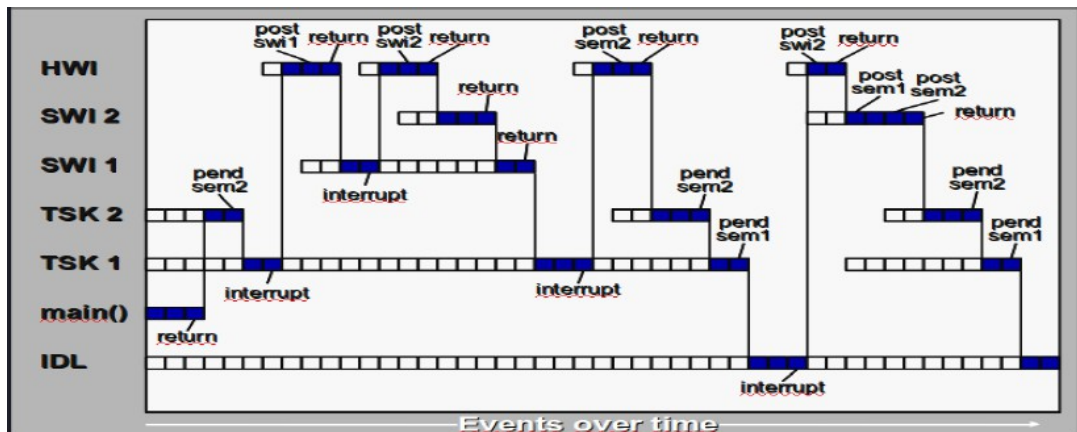
DSP/BIOS využíva preemptívny multitasking, pri ktorom jadro odoberá riadenie úlohe bez ohľadu na jej stav, na rozdiel od kooperatívneho multitaskingu kedy sa úloha vzdáva riadenia sama. Procesy sa navzájom nesmú ovplyvňovať a tak má každý svoj kontext, kedy má každý proces oddelenú pamäť chránenú pred inými procesmi a uložené registre, prepína sa aj zásobník.

Prepínanie procesov je blokovo znázornené na obrázku 10. Riadenie v podstate prebieha tak, že jadro priradí riadenie procesu v stave TSK\_READY, tento sa ho môže dobrovoľne vzdať funkciou TSK\_yield v prospech iného procesu s rovnakou prioritou, prípadne TSK\_sleep v prospech procesov s nižšou prioritou. Na pozadí prebieha proces Idle ktorý má najnižšiu prioritu a riadenie preberá iba ak nieje iný proces aktívny, využíva sa na časovo nekritické operácie.



Obrázok 10: Stavy procesov

Prepínanie procesov má nižšiu prioritu ako prerušenia (softwarové aj hardwarové). Najväčšie rozdiely medzi prepínaním procesov a prerušeniami spočívajú v tom, že prerušenia neprepínajú kontext, zdieľajú zásobník a nesmú čakať na udalosť. Príklad prepínania medzi rôznymi procesmi je na obrázku 11.



Obrázok 11: Prepínanie procesov

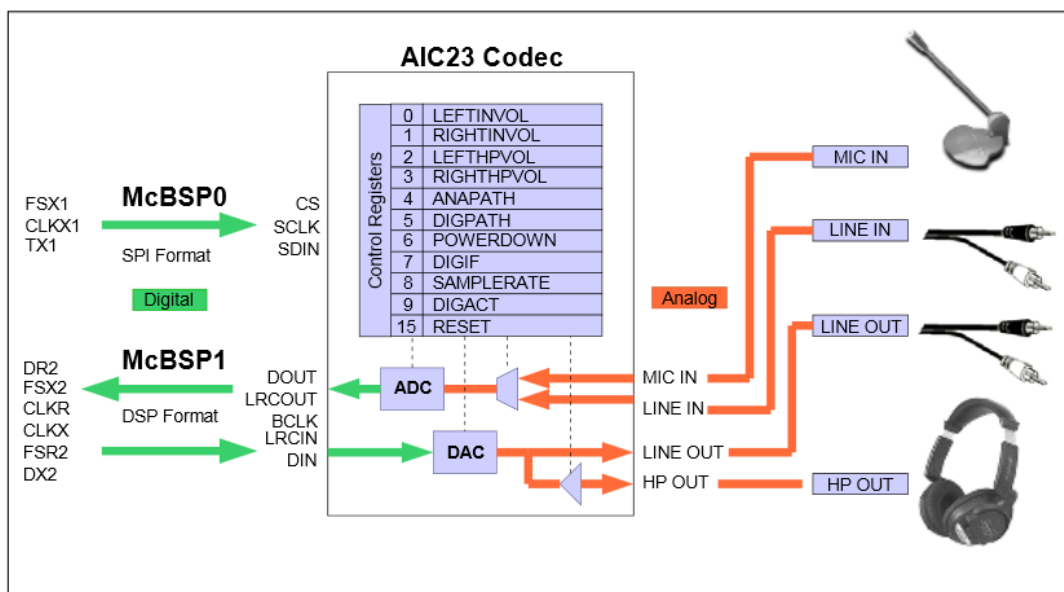
V tejto práci sú ďalej používané semafore, ktoré zaisťujú atomické operácie procesu, čiže riadenie nemôže byť odobrané iným procesom. Nosnými funkciami sú funkcia `SEM_pend( SEM_handle, Uns timeout);` ktorá čaká *timeout* nanosekúnd na nenulovú hodnotu semaforu ( `SEM_handle`), v prípade nenulovej hodnoty vracia TRUE (použiteľné napríklad v *if* podmienkach). Komplementárnou funkciou je `SEM_post( SEM_handle)`, ktorá inkrementuje hodnotu semaforu `SEM_handle` a zobudí vlákno ktoré naň čaká.

### 4.3 Vstupný signál

Vstupný signál je vzorkovaný stereofónnym kodekom TLV320AIC23, vzorky sú následne za použitia Multichannel Buffered Serial Portu (McBSP) a Enhanced Direct Memory Access (EDMA) spracúvané procesorom. Obrázok 11 znázorňuje kodek AIC23, jeho kontrolné registre, prepojenie s okolím pomocou štyroch audio jackov a komunikáciu s procesorom pomocou McBSP.

Na základe manuálu ku kódedku [13] a použitia knižnice `aic23.h` bola nastavená vzorkovacia frekvencia na 44,1 kHz a 16-bitová kvantizácia. McBSP slúži na komunikáciu procesora s kodekom, pričom prvý kanál sa venuje ovládaniu kodeka a druhý kanál odosiela a prijíma vzorky. Pomocou EDMA bola ďalej nastavená dvojica bufferov (tzv. ping-pong buffery) do ktorých sa striedavo zapisujú a čítajú vzorky.

Vstupný signál je potom v hlavnom kóde čítaný a zapisovaný do vstupného bufferu dĺžky 2048 (*l\_buffer*). Ako bolo spomenuté, dĺžka spracúvaného okna je 1024 vzoriek (približne 23ms zvukového záznamu), vstupný buffer má dvojnásobnú dĺžku z dôvodu ukladania jedného vzorku pre každý kanál, každá nepárna vzorka je teda nulovaná a každá párna skopírovaná do zvláštného bufferu dĺžky 1024 (*l\_buffer2*). Vhodným nastavením McBSP by bolo možné docieľiť ukladanie iba jedinej vzorky pre oba kanály (ľubovľne pravej alebo ľavej), ako bude ale ukázané neskôr, je výhodné mať dva buffery, jeden prekladaný nulami dĺžky 2048 a druhý priebežne vzorkovaný pre jediný kanál.



Obrázok 12: TMS320C6713 DSK kodek [12]

Po zaplnení týchto bufferov nasleduje ich skopírovanie do pracovných bufferov (*w\_buffer* a *w\_buffer2*), do pôvodných bufferov pokračuje ukladanie nových vzoriek, zatiaľ čo tieto sú používané pri výpočtoch. Podľa požiadaviek je zabezpečené prekryvanie nasledujúcich okien o 1/4, teda o 256 vzoriek. V nasledujúcom úseku kódu je možné vidieť realizáciu čítania vzoriek, zapisovania do bufferov a prekryvanie. V tomto kóde ešte nie je zahrnuté spracovanie signálu, je tu ale prítomné nastavenie semaforu ktorý prebúdzá vlákno určené na spracovanie získaných dát. LENGTH je definovaná ako dĺžka bufferu 2048 vzoriek (pre prekladaný buffer).

```
while ( 1)
{
    AIC23_ReadWait( CodecHnd, &sample);
    // Čítanie aktuálnej vzorky

    l_buffer[writeBuf] = (short) sample/(37268.0*0.55);
    // ukladanie do kruhového bufferu a prevod na float

    if(writeBuf % 2 == 1)
        // nulovanie imaginárnej časti

    l_buffer[writeBuf] = 0;

    if(writeBuf % 2 == 0){
        // ukladanie do neprekladaného bufferu

    if(l_buffer[writeBuf] >= 0.1)

        DSK6713_LED_on(2);

    else

        DSK6713_LED_off(2);

    }

    // detekcia zvukového pozadia
```

```

l_buffer2[writeBuf/2] = l_buffer[writeBuf];
writeBuf = (writeBuf + 1) & (LENGTH-1);
// kruhová inkrementácia ukazovateľa v buffery

if(writeBuf == LENGTH-1){
// Časť pre spracovanie pri plnom buffery

    memcpy(w_buffer, l_buffer, LENGTH*sizeof(float));
    // kopírovanie do pomocného bufferu

    memcpy(w_buffer2, l_buffer2, LENGTH*sizeof(float)/2);
    // kopírovanie do pomocného bufferu

    memcpy(l_buffer, &l_buffer[(3*LENGTH/4)],
LENGTH*sizeof(float)/4);

    // prekrývanie o 1/4 bufferu

    memcpy(l_buffer2, &l_buffer2[(3*(LENGTH/8))],
LENGTH*sizeof(float)/8);

    // prekrývanie o 1/4 bufferu (v neprekladanom buffery)
writeBuf = (LENGTH/4);
    // zápis nových vzoriek od jednej štvrtiny

    SEM_post(&semCalc);

    // semafor povolujúci výpočet parametrov

}

AIC23_WriteWait( CodecHnd, sample);

// odoslanie vzorky pre demonštračné účely

}

```

Získané dáta sú následne spracované v troch blokoch podľa blokovej schémy na obrázku 4, v tomto prípade však nie sú radené paralelne ale sériovo, na konci každého bloku sú aplikované kritéria a na ďalší blok program postupuje iba v prípade, že boli splnené požiadavky bloku predchádzajúceho.

Radenie blokov bolo zvolené tak, aby sa ako prvé počítali výpočetne menej náročné parametre (LPC koeficienty) a ďalšie parametre boli počítané iba v prípade, že daný úsek vyhovelo kritériám. Ďalším parametrom je výpočet energie v rôznych pásmach a ako posledná je počítaná korelácia. V prípade, že sú splnené všetky tri kritériá je ako signál zvolená aktivácia LED 3. Spracúvanie dát je signalizované zvláštnou LED *busy*, ktorá signalizuje aktivitu procesoru.

Zariadenie ďalej signalizuje zvukové pozadie, toto je realizované svetelnou signalizáciou diódy LED 2, táto reaguje na vstupnú úroveň signálu vyššiu ako 0,1. Vo výsledku potom blikanie LED spolu so zotrvačným efektom oka ukazuje obálku zvukového signálu.

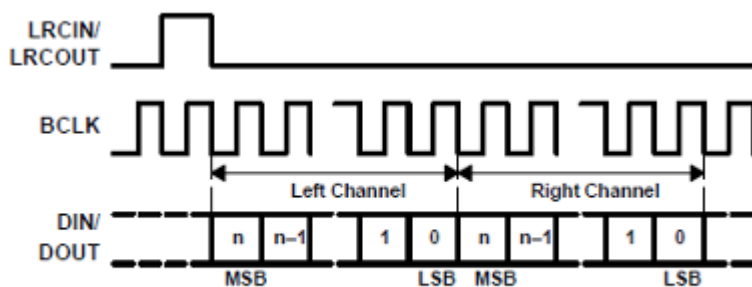
### 4.3.1 McBSP

Ako už bolo naznačené, McBSP je sériová zbernica pomocou ktorej je na vývojovom kите TMS320C6713 DSK pripojený kodek AIC23, jedno rozhranie slúži na konfiguráciu (MCBSP\_DEV0) a druhé na prenos vzoriek (MCBSP\_DEV1), komunikácia prebieha



pomocou 32-bitových dátových a konfiguračných registrov. Táto časť má za úlohu stručné oboznámenie s McBSP na základe [14].

Táto zbernica umožňuje plne duplexnú komunikáciu, voľbu medzi dĺžkami slov 8, 16, 20, 24 a 32 bitov,  $\mu$ -Law alebo A-Law komponding. Rozhranie je možné konfigurovať do niekoľkých módov, so zarovnaním vpravo / vľavo, rozhranie I2S alebo rozhranie DSP ktoré je používané v tejto práci, obrázok 8, prebratý z [14] ukazuje časovanie v tomto móde. Prijímané dáta je možné čítať z data receive registru (DRR) pomocou CPU alebo EDMA, v tejto práci je kvôli rýchlosti využívaný prístup EDMA, ktorý bude opísaný v nasledujúcej kapitole. Pripravenosť dát na čítanie je daná príznakom RRDY, ktorý je nastavený za prítomnosti neprečítaných dát, v opačnom prípade nulový. S týmto príznakom je previazaný signál pre EDMA, receive event (REVT) pre každý kanál McBSP, alebo môže byť používané prerušenie receive interrupt (RINT) pri čítaní obsahu pomocou CPU. Podobne je obsluhované odosielanie, ktoré ale v tejto práci nieje využívané. Konfiguračné registre McBSP portu môžu byť nastavené použitím funkcií z knižnice Chip Support Library (CSL) [15], definované sú v `cs1_mcbasp.h`.



Obrázok 13: Časovanie v móde DSP

### 4.3.2 EDMA

Radič Direct Memory Access (DMA) slúži na prenos dát medzi vnútornou pamäťou, externou pamäťou a perifériami bez asistencie jadra procesora. Tento prenos je synchronizovaný udalosťami od periférií alebo signálom na pine procesora. Radič môže generovať prerušenia a to pri rôznych udalostiach, napríklad dokončenie prenosu bloku alebo rámca.

Prenášané údaje sú ukladané do FIFO (first in first out) pamäte a z tejto pamäte sú potom zapisované do iného portu. Každý kanál má dve sady riadiacich registrov, pracovný a konfiguračný.

Prenos prebieha po blokoch, každý blok obsahuje určitý počet rámcov (príznak FRMCNT) a každý rámec určitý počet elementov (príznak ELECNT). Tieto príznaky sú nastavované pomocou tzv. deskriptorov. Spolu s týmito parametrami sa pomocou

deskriptorov nastavujú aj adresy čítania a zápisu, spôsob inkrementácie (resp. dekrementácie) ukazovateľa pre zápis ale aj linkovanie ktoré je používané pri tvorbe ping-pong bufferov ktoré sa pri čítaní striedajú. Detailnejší popis práce s priamym prístupom k pamäti je dostupný v [16].

## 4.4 Fourierova transformácia

Často využívaným nástrojom v tejto práci je Fourierova transformácia, vzhľadom na jej široké použitie v rôznych aplikáciach je dostupná aj v knižniciach. V tejto práci je používaná transformácia z knižnice TMS320C67x digital signal processor library (Dsplib) [17]. Táto kapitola teda slúži na zoznámenie s funkciou z tejto knižnice a s ďalšími pomocnými funkciami.

Vstupom tejto funkcie je vektor komplexných čísel dĺžky  $N$ , v jazyku C realizovaný ako vektor dĺžky  $2*N$  (2048) so striedajúcimi sa reálnymi a imaginárnymi číslami. Výstupom funkcie je potom vektor dĺžky  $2*N$  predstavujúci striedajúce sa reálne a imaginárne zložky spektra. Vzhľadom na čisto reálny vstup v tejto práci bude využitý vektor dĺžky  $N$  prekladaný nulami (vo výsledku teda dĺžky  $2*N$ ), ktorý je k dispozícii vo vstupnom buffery. Ďalej je potrebné vytvoriť vektor s twiddle faktormi, tento je generovaný pomocnou funkciou `gen_w_r2(twiddle, N)`; do matice *twiddle*, opäť sa jedná o vektor dĺžky  $N$  obsahujúci  $N/2$  komplexných čísel. Tento vektor je potrebné bitovo reverzovať funkciou `bit_rev(twiddle, N>>1)`; . Ak chceme pracovať s modulom spektra, je potrebné ho vypočítať ako druhú odmocninu súčtu kvadrátov imaginárnej a reálnej zložky, pre energetické spektrum je výsledok následne umocnený na druhú.

Komplementárnou funkciou v tejto knižnici je inverzná Fourierova transformácia. Výstup Fourierovej transformácie je v bitovo reverzovanej podobe a tak, ak je zamýšľaná práca so spektrom, je potrebné použiť vyššie uvedenú funkciu na správne usporiadanie výstupného vektoru. Vstupom inverznej transformácie je zase bitovo reverzovaná postupnosť. Následujúci úryvok kódu ukazuje transformáciu vstupného vektoru  $x$  a následný spätný prevod do pôvodnej podoby, ukážka prebraná z [17]:

```
gen_w_r2(twiddle, N);           // Generate coefficient table
bit_rev(twiddle, N>>1);        // Bit-reverse coefficient table
DSPF_sp_cfft2_dit(x, twiddle, N);
                                // radix-2 DIT forward FFT
                                // input in normal order, output in
                                // order bit-reversed
                                // coefficient table in
                                // bit-reversed order
DSPF_sp_icfft2_dif(x, twiddle, N);
                                // Inverse radix 2 FFT
                                // input in bit-reversed order,
                                // order output in normal
```

```


divide(x, N);



// coefficient table in



// bit-reversed order



// scale inverse FFT output



// result is the same as original



// input


```

Ako je možné vidieť v ukážke, výstup inverznej transformácie je potrebné vydeliť polovičnou dĺžkou vektora aby bol výstup totožný so vstupom.

## 4.5 Korelácia

Prvým blokom ktorý spracúva vstupný signál je korelácia so vzorovým výstrelom dĺžky 1024 vzoriek, rovnako ako vstupné bloky. Knižnicu pre túto funkciu sa nepodarilo nájsť, bolo preto potrebné funkciu vytvoriť.

Pri výpočte korelácie je v tomto prípade uplatňovaný vzorec (6) kvôli skráteniu celého výpočtu, hoci v tomto konkrétnom prípade sa informácia o tom, či sa jedná o výstrel vyskytuje spravidla pre posunutia +/- 400 a teda by nebolo potrebné počítať pre  $2*N$  posunutí. Pre porovnanie je v tabuľke 5 uvedený počet potrebných operácií (násobení + sčítaní, nepočíta sa s Fourierovou transformáciou) pri použití vzorca (5) pre  $2N$  posunutí (kde by stačilo použiť reálny signál o dĺžke  $N$ , nie komplexný o dĺžke  $2N$ ), pre 800 posunutí a pri použití vzorca (6), ktorého výstupom sú hodnoty pre všetkých  $2N$  (2048) posunutí, ich usporiadanie nieje totožné so vzorcom (5), toto však v tejto aplikácii nieje prekážkou.

	Vzorec (5) pre 2048 posunutí	Vzorec (5) pre 800 posunutí	Vzorec (6)
Počet operácií	4 914 304	1 638 400	12 228

Tabuľka 4: Porovnanie výpočetnej náročnosti v daných podmienkach

Vstupom tohto algoritmu sú dva signály dĺžky  $N$  doplnené o  $N$  núl na konci signálu, vzhľadom na fakt, že funkcia používa Fourierovu transformáciu, celý signál je ďalej doplnený o imaginárnu časť, teda jeho dĺžka je ďalej zdvojnásobená na  $4*N$  (4096 hodnôt). Korelačné kritérium je jediným, kde sa používa vzorový výstrel, keďže je v tejto funkcii používané iba spektrum časovo reverzovaného signálu, toto je vypočítané pred implementáciou a inicializované ako samostatná premenná kvôli šetreniu početného výkonu.

Funkcia realizujúca výpočet korelácie a kontrolu korelačného kritéria je deklarovaná ako `int xcorr(float* x, float* w);` so vstupným vektorom  $x$  dĺžky 2048 (vektor prekladaný nulami) a vektorom  $w$  obsahujúcim twiddle faktory vypočítané pri spustení programu, výstupom je binárna hodnota udávajúca splnenie kritéria. Nižšie je uvedená ukážka zdrojového kódu spolu s komentármi uvádzajúcimi význam jednotlivých príkazov.

```

memcpy(xp, x, LENGTH * sizeof(float));
// úvodné doplnenie nulami - výsledkom signál 2*LENGTH, tj. 4096

DSPF_sp_cfft2_dit( xp, w, LENGTH);
// Fourierova transformácia vstupného signálu

bit_rev(xp, LENGTH); // bitová reverzácia výstupu

for(i=0; i<(2*LENGTH); i=i+2){
// komplexné násobenie spektier vzorka po vzorka
    c[i] = xp[i]*yp[i] - xp[i+1]*yp[i+1];
    c[i+1] = xp[i]*yp[i+1] + xp[i+1]*yp[i];
}

bit_rev(c, LENGTH); // bitová reverzácia vstupu IFFT

DSPF_sp_icfft2_dif(c, w, LENGTH);
// inverzná Fourierova transformácia, výsledkom je korelačný
vektor v premennej c

divide(c, LENGTH);
// delenie ktoré nebolo súčasťou funkcie IFFT

for(i=0; i<(2*LENGTH) && corflag == 0; i=i+2){
// kontrola splnenia kritéria, iba "reálne" vzorky
    if(c[i] >= THRESHOLD)
        corflag = 1;
}

```

Konštanta THRESHOLD je pomocou direktívy #DEFINE stanovená na hodnotu 60 v súlade so simuláciou.

## 4.6 LPC koeficienty

Tento blok realizuje výpočet LPC koeficientov pre vstupný signál a následné porovnanie s hraničnými hodnotami. Knižnica pre výpočet LPC koeficientov nebola nájdená, potrebná funkcia bola vytvorená na základe Levinson-Durbinovho algoritmu.

Použitie Levinson-Durbinovho iteračného algoritmu vyžaduje ako vstup autokorelačnú Toeplitzovu maticu, ako bolo spomínané v teoretickej časti najvyššie potrebné posunutie je dané rádom požadovaných LPC koeficientov, v tomto prípade teda osem. Funkcia autokorelácie je realizovaná pomocou knižnice TMS320C67x digital signal processor (DSP) Library (Dsplib) [17]. Vstupom funkcie je vektor hodnôt  $x$  o dĺžke  $N+nr$ , kde  $nr$  je najvyššie posunutie (rád LPC koeficientov). Návratovou hodnotou je potom vektor o dĺžke  $nr$ , ktorý reprezentuje výsledné hodnoty autokorelácie pre posunutie dané pozíciou hodnoty vo vektore.

Samotný Levinson-Durbinov algoritmus využíva niekoľko pomocných premenných a vektor chybových hodnôt na základe ktorého sú korigované ďalšie

iterácie. Počet cyklov algoritmu opäť závisí na požadovanom ráde LPC koeficientov, teda osem.

Realizovaná funkcia, ktorá sa stará o výpočet LPC koeficientov aj ich kontrolu je deklarovaná ako `int lpc(float* x);`, kde vstupom je vektor  $x$  dĺžky 1024 vzoriek a výstupom binárna informácia o zhode prípadne nezhode kritérií. Nasleduje krátka ukážka zdrojového kódu v ktorej už nieje zahrnutá kontrola kritérií, výsledné koeficienty používané pri vyhodnotení sú uložené na pozíciách `a[3][7]`, `a[4][7]`, `a[6][7]`.

```
memcpy(&in[nr], x, LENGTH*sizeof(float)/2);
// úvodné doplnenie signálu nr nulami
DSPF_sp_autocor( out, in, nx, nr);
// autokorelácia vstupného signálu

E[0] = out[0];
// prvá hodnota korekčného vektoru je odvodená od hodnoty
autokorelácie pre nulové posunutie

for(p=1; p<9; p++){
// Iteračná rutina pre výpočet koeficientov
    a[0][p-1] = 1;
// nultý koeficient je vždy rovný 1
    temp = 0;
    for(s=0; s<p; s++){
        temp += a[s][p-1]*out[p-s];
    }
    k[p] = -temp/E[p-1];
    a[p][p] = k[p];
    for(s=1; s<p; s++){
        a[s][p] = a[s][p-1]+k[p]*a[p-s][p-1];
// výsledné koeficienty sú uložené na hodnotách a[n][7]
    }
    E[p] = (1-k[p]*k[p])*E[p-1];
// hodnota chybového vektoru
}
```

## 4.7 Pásmová filtrácia

Pásmová filtrácia je realizovaná vo frekvenčnej doméne. V súlade s teoretickým rozborom sú vstupné hodnoty pomocou funkcie `DSPF_sp_cfft2_dit(x, twiddle,`

N); prevedené do spektrálnej oblasti. Následne je vypočítaná energia ako kvadrát modulu. V tejto funkcii bolo potrebné skopírovať vstupné údaje do zvláštnej premennej vzhľadom k tomu, že dochádza k ich zmene a tento blok nieje posledným, údaje pre ďalší blok by boli ovplyvnené.

```
for(i=0; i<LENGTH/2; i++){
    modul[i] = pow((sqrt(x[2*i]*x[2*i] + x[2*i+1]*x[2*i+1])),2);
}
```

Hodnoty sú následne rozdelené do zodpovedajúcich pásem, sčítané a podelené hodnotou 70 (počet vzoriek v každom pásme). Takto získané energetické údaje sú porovnané so stanovenými hranicami a nakoniec je určené či je kritérium splnené.

## 4.8 Výsledná realizácia výpočtov

V tejto kapitole je prezentovaná výsledná realizácia výpočtov parametrov a svetelná signalizácia v prípade zhody, zdrojový kód zodpovedá vývojovému diagramu na obrázku 8.

```
void calc( void)
{
    int corflag, lpcflag, bandflag;
    int i = 0; // čítač cyklov

    while(1){
        if( !SEM_pend(&semCalc, SYS_FOREVER)){
            continue;
        } // proces citlivý na semafor semCalc

        i = (i + 1) & (LENGTH-1);
        // čítanie cyklov ako časovač signalizácie
        lpcflag = lpc(w_buffer2);
        if(lpcflag == 1){
            bandflag = energy(w_buffer, twiddle);
            if(bandflag == 1){
                corflag = xcorr(w_buffer, twiddle);
                if(corflag == 1){
                    DSK6713_LED_on(3); // signalizácia výstrelu
                    i = 0;
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        }
    }
}

if(i == 55) // približne 1 sekunda
    DSK6713_LED_off(3);
}
}

```

Proces *calc* je nadväzujúci na proces vzorkujúci vstupný signál opísaný v kapitole 4.3. *Calc* je proces s nižšou prioritou ako vzorkovací proces a je spúšťaný semaforom *semCalc* ktorý je inkrementovaný na konci vzorkovacej funkcie. V tomto procese je čítač cyklov realizovaný cyklickou inkrementáciou premennej *i*, funkcia čítača bude objasnená nižšie.

Hlavným telom procesu je výpočet parametrov vo *while* slučke, ako bolo spomínané v úvode, výpočet parametrov zodpovedá vývojovému diagramu. V prípade, že sú kritéria splnené, je rozsvietená LED 3 a vynulovaný čítač. Proces výpočtu parametrov je spúšťaný vždy keď je naplnený vstupný buffer dĺžky 1024 vzoriek. Vzhľadom k tomu, že po sebe nasledujúce okná sa prekrývajú o 1/4, každé plnenie zaberie  $t = 17,41$  ms, výpočet je uvedený nižšie.

$$t = \frac{\frac{3}{4} \cdot N}{f_{vz}} \cdot 1000 [ms] = \frac{\frac{3}{4} \cdot 1024}{44100} \cdot 1000 = 17,41 ms \quad (17)$$

Svetelná signalizácia prítomnosti výstrelu bola stanovená na približne jednu sekundu, teda zhruba 55 zavolaní funkcie *calc*. Po uplynutí tohto intervalu sa LED 3 vypne a čaká na ďalšie splnenie kritérií. Zmeškané detekcie v tomto prípade nepredstavujú problém keďže prioritou je určiť či sa vo zvuku vyskytuje výstrel, nie je dôležité presne vedieť koľko výstrelů bolo.

## 5 VÝSLEDKY A VYHODNOTENIE

Kapitola výsledky a vyhodnotenie zhŕňa výsledky dosiahnuté vo fáze simulácií v programe Matlab aj výsledky implementácie na vývojovej doske TMS320C6713.

### 5.1 Simulácia

Zostavovanie a testovanie rozpoznávacieho algoritmu prebiehalo v programe Matlab.

Tabuľka 5 ukazuje falošné alarmy pre každé kritérium zvlášť, tabuľka 6 potom pre kombináciu dvoch kritérií a nakoniec aj pre všetky tri kritériá.

Trieda	Korelácia	LPC	Energia
Drevo	20 / 25	25 / 25	25 / 25
Pes	12 / 13	13 / 13	8 / 9
Ostatné	7 / 9	9 / 9	6 / 9
Slon	5 / 14	13 / 14	4 / 14

Tabuľka 5: Falošné alarmy pre jedno kritérium

Ako je možné vidieť v tabuľke, samostatne nieje žiadne kritérium vhodné, z týchto prípadov najlepšie obstála korelácia, najhoršie sú potom LPC koeficienty ktoré v každej z nahrávok až na jednu nahrávku slona určili prítomnosť výstrelu.

Trieda	Korelácia + LPC	Korelácia + Energia	LPC + Energia	Korelácia + LPC + Energia
Drevo	13 / 25	10 / 25	22 / 25	3 / 25
Pes	4 / 13	1 / 13	4 / 13	0 / 13
Ostatné	3 / 9	1 / 9	3 / 9	0 / 9
Slon	2 / 14	1 / 14	4 / 14	0 / 14

Tabuľka 6: Falošné alarmy pre viacero kritérií

Ako bolo spomenuté už v kapitole venovanej opisu zvukovej databáze, niektoré nahrávky majú až dve minúty. Falošné alarmy boli spôsobované rôznymi časťami týchto nahrávok, druhá tabuľka ukazuje, že kombinácie rôznych dvoch kritérií mali



stále za následok vysoký počet falošných alarmov. Najlepšie obstála kombinácia korelácie a energie v pásmach, tu bol však stále problém s kategóriou lámania a praskania. Ako je možné vidieť najmä na kategórii drevo, každé z kritérií sa sústreďuje na „iný druh“ falošného alarmu, keďže kritéria zaznamenávajú veľký počet falošných alarmov jednak samostatne a v určitej miere aj vo dvojiciach. Kombinácia všetkých troch kritérií nakoniec poskytla uspokojivé výsledky, dosiahnutá bola úroveň 12 % (teda 3 z 25) falošných alarmov v triede „drevo“ a 0 % v ostatných kategóriách.

Malý počet falošných alarmov v kategórii sloních zvukov je možné vysvetliť jednak tým, že pokým trúbenie je pomerne hlasné a môže byť klasifikované ako výstrel, ostatné zvuky nemajú tak výrazne impulzný charakter, druhým dôvodom môže byť nahrávanie v uzavretých priestoroch čo výrazne obmedzí okolitý šum a v tomto ohľade zlepši kvalitu nahrávky.

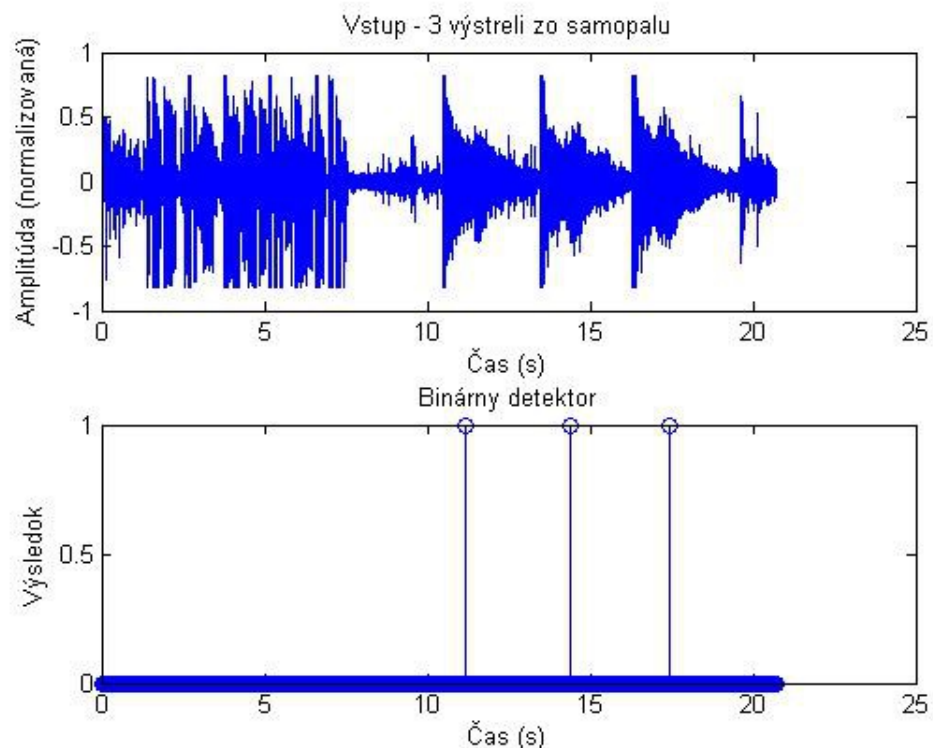
Nasledujúca tabuľka 7 ukazuje správne detekcie výstrelů v záznamoch streľby opäť pre každé kritérium samostatne a pre kombinácie.

Kritéria / Trieda	Samopal	Puška
Korelácia	26 / 26	4 / 4
LPC	26 / 26	4 / 4
Energia	24 / 26	3 / 4
Energia + LPC	23 / 26	2 / 4
Korelácia + LPC	22 / 26	2 / 4
Korelácia + Energia	21 / 26	3 / 4
Korelácia + LPC + Energia	21 / 26	2 / 4

Tabuľka 7: Správne detekcie výstrelů

Ako sa dalo očakávať podľa tabuľky s falošnými alarmami, menší počet kritérií kladie menšie nároky a tak označí viacero nahrávok za výstreli. Rovnaký trend sa dá pozorovať aj tu, pokým jednotlivé kritériá označia takmer všetky nahrávky za výstreli, kombinácie začínajú eliminovať pozitívne detekcie. Tento fakt je nepríjemný ale niekoľkými vyradenými výstrelmi je vykúpené výrazné zlepšenie v oblasti falošných alarmov. Výsledná správnosť v kategórii samopalů je 81 % ( 21 nahrávok z 26), kategória výstrelů z pušky je vzhľadom na svoju veľkosť iba vedľajšia.

Obrázok 14 ilustruje výstup z programu Matlab, horná časť zobrazuje zvukový vstup, tri výstreli zo samopalu ktorým predchádza zvukový komentár, spodná časť reprezentuje detektor, ako je vidieť na obrázku, výstreli boli detekované a reč zostala bez odozvy.



Obrázok 14: Detekcia troch výstrelů ze samopalu

## 5.2 Výsledky na signálovom procesore

Táto kapitola zhŕňa výsledky dosiahnuté pri implementácii algoritmu na digitálnom procesore. Porovnanie výsledkov pri implementácii oproti dosiahnutým výsledkom počas simulácie ako aj rozbor týchto odlišností bude nasledovať v ďalšej kapitole.

V tabuľke 8 sú uvedené výsledky správnych detekcií v kategóriách samopal a puška pre všetky tri kritéria popísané v predchádzajúcich kapitolách. Nasledujúca tabuľka 9 uvádza počet falošných detekcií vo zvyšných kategóriách.

Trieda	Počet správnych detekcií
Samopal	21 / 26
Puška	2 / 4

Tabuľka 8: Správne detekcie na procesore

Trieda	Počet falošných alarmov
Drevo	18 / 25
Pes	1 / 13
Ostatné	2 / 9
Slon	5 / 14

Tabuľka 9: Falošné alarmy na procesore

Dosiahnutá detekcia výstrelov dosahuje pomerne úspešné výsledky, zatiaľ čo pomer falošných alarmov k celkovému počtu udalostí je neprimerane vysoký, možné príčiny tohto stavu budú diskutované v ďalšej kapitole.

Vzhľadom na obmedzenú dĺžku okna, pri menej reprezentatívnych nahrávkach hrá určitú rolu pri úspešnosti detekcie aj úsek nahrávky ktorý bol zachytený, je možné, že jedna zvuková udalosť rozdelená do dvoch okien nebude detekovaná ani v jednom z nich. Tomuto javu má predchádzať čiastočné prekryvanie okien tak, aby bola väčšia šanca zachytiť dôležitú udalosť celú aspoň v jednom z okien.

### 5.3 Porovnanie dosiahnutých výsledkov

Hoci použitie zvolenej metódy v Matlabe sľubovalo výsledky porovnateľné s niektorými inými metódami opisovanými v tejto práci, dosiahnuté výsledky na signálovom procesore obsahujú veľký počet falošných alarmov, táto kapitola sa pokúsi nájsť možné príčiny tohto stavu.

Celá práca bola rozdelená na časti ktoré vykonávali čiastkové operácie a navzájom si predávali výsledky, problém mohol nastať v každej z týchto častí, prípadne pri vzájomnej komunikácii medzi jednotlivými časťami. Prvou možnosťou je nepresný prenos zvukového záznamu do procesora. Hoci kvantizácia aj vzorkovacia frekvencia boli rovnaké ako na počítači, úroveň signálu vstupujúceho do procesora musela byť násobená konštantou aby dosahovala úrovni používaných v počítači (+1 až -1), pri tomto procese mohlo dôjsť k nepresnostiam ktoré by zaviedli chybu do všetkých ďalších výpočtov. Prípadná chyba mohla byť vnesená aj pri prekryvaní nasledujúcich okien, táto však bola vylúčená pozorovaním vstupných dát.

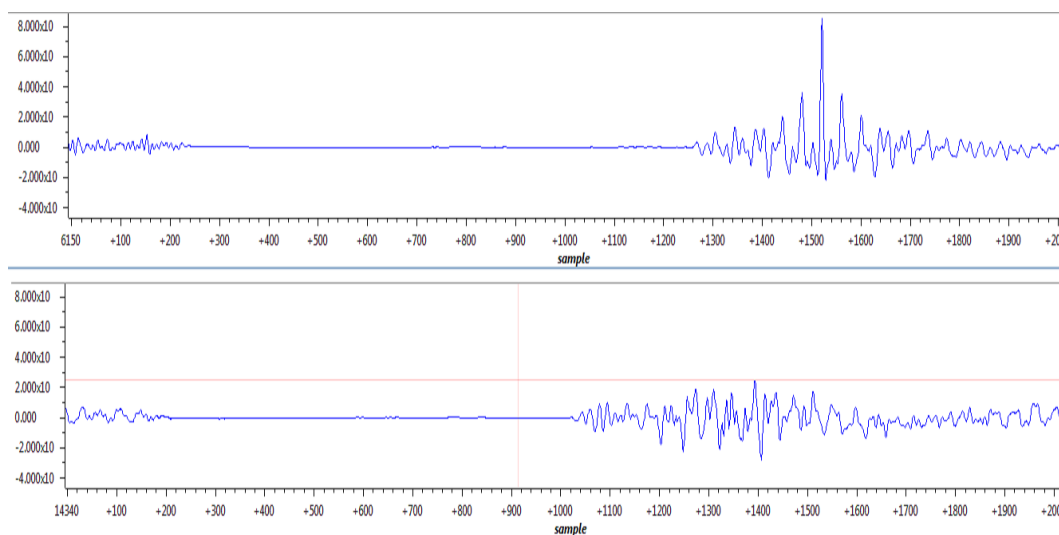
Možnosť vnesenia chyby pri komunikácii medzi jednotlivými blokmi je nepravdepodobná pretože bolo overené, že vzorkovanie prebieha v definovanom časovom rozmedzí (teda 23ms pre jedno okno, ~17,4 ms pre prekryvajúce sa okno). Chyby sa ďalej opakovane vyskytujú na rovnakých úsekoch nahrávok, to vylučuje možnosť, že by nastala náhodná chyba (výpadok jedného z výpočtov).

Ďalšími blokmi boli samotné bloky pre výpočet a overovanie parametrov. Ako bolo spomínané vyššie, radenie blokov bolo určené podľa početnej náročnosti. Celý algoritmus bol testovaný jednotlivo po blokoch aj v súčinnosti blokov spolu. Pri pohľade na dosiahnuté výsledky je možné zistiť, že LPC koeficienty ako aj energia v

jednotlivých pásmach nadobúda hodnoty približne zodpovedajúce hodnotám dosahovaným pri simulácii v programe Matlab. Dosahované hodnoty sa pohybujú v mierne užšom pásme ako boli zaznamenané pri simulácii. Problém nastáva pri korelácii.

Pri pozorovaní výsledkov korelácie dosiahnutých na procesore bolo možné zaznamenať odlišné hodnoty ako pri simuláciách. Výsledky falošných alarmov získané z procesora navyše približne zodpovedajú (dosahujú lepšie výsledky) hodnotám pri simulácii za použitia iba kritérií LPC koeficientov a energie v pásmach, toto nasvedčuje možnosti problému s koreláciou.

Ako korelačný vzor bol najskôr použitý rovnaký úsek streľby ako pri simulácii, jeho spektrum bolo vypočítané pomocou Matlabu a inicializované v kóde. Hodnoty korelácie však dosahovali pre ďalšie výstreli výrazne nižších čísel, rovnako priebeh v mnohých prípadoch nenaznačoval výstrel. Z tohto dôvodu bol zvolený iný výstrel ktorý mal slúžiť ako vzor, avšak s rovnakými problémami. Tieto výsledky by mohli naznačovať odlišnosti v signále, či už pri prenose zvuku alebo pri výpočtoch spektra, vzniknuté napríklad zaokrúhľovaním. Nasledovalo teda nahranie zvukového signálu do procesora, výpočet spektra priamo v ňom a uloženie tejto hodnoty do premennej. Korelácia s rovnakým signálom v tomto prípade dosahovala očakávaných hodnôt aj priebehu, čo by vylučovalo chybu vo výpočtoch korelácie, korelačný algoritmus bol samozrejme pred implementáciou testovaný aj na jednoduchších signáloch s očakávanými výsledkami. Problémom bola ale znova korelácia s inými výstrelmi, jej hodnoty stále dosahovali iba mierne zvlnený priebeh a nízke hodnoty. Porovnanie korelácie signálu samého so sebou (hore) a signálu s iným výstrelom (dole) sú ukázané na obrázku 15.



Obrázok 15: Výsledné korelácie pre dva výstreli

Tento stav by mohol poukazovať na mierne skreslenie signálu oproti tomu používanému v počítači. Proti skresleniu svedčí fakt, že reprodukovaná nahrávka nenesie stopy skreslenia a priebeh sínusového signálu na osciloskope nenaznačuje skreslenie (porovnaný priebeh na vstupe a výstupe vývojového kitu). Isté riziko skreslenia je možné v prípadoch hlasných impulzných zvukov kedy dochádza k spusteniu výpočtovo náročnejších operácií, avšak tomuto by mala predchádzať vyššia

priorita vzorkovacieho procesu, ktorý by mal preberať riadenie od výpočtového v momente kedy je k dispozícii nová vzorka signálu.

Podstatné však je, že toto zníženie korelácie oproti výsledkom dosahovaným v simulácií nieje proporcionálne aj pre iné impulzné signály, má to dva dôsledky. Prvým je, že pri implementácii bolo potrebné znížiť prah pre korelačné kritérium, ktorý je teraz stanovený na hodnotu 20, v opačnom prípade by nebolo možné dosiahnuť významný počet detekcií v kategórii výstrelů. Druhým dôsledkom je, že toto kritérium týmto krokom stráca na svojom význame, hoci nieje úplne zbytočné, nieje možné dosiahnuť predpokladané výsledky v kategórii falošných alarmů.

Vylepšenie tohto stavu je možné analýzou signálu priamo na signálovom procesore a prispôsobenie parametrov pre zvolený systém. V prípade, že príčinou neuspokojivých výsledkov korelácie je skreslenie signálu bude potrebné zvoliť iné kritérium, prípadne zvoliť inú metódu získavanie vzoriek tak, aby bolo možné koreláciu použiť.

## 6 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť a overiť algoritmus schopný v reálnom čase rozlišovať či je v snímanom zvuku prítomný výstrel alebo nie, s dôrazom na nízky počet falošných alarmov a odolnosť voči iným impulzným zvukom. Tento modul detekujúci výstreli má slúžiť ako časť obojku pre slony na ich ochranu pred pytlákmi, mal by byť teda prispôsobený na africké podmienky.

Úvodom práce sú bližšie opísané požiadavky na zariadenie a podmienky v akých by zhruba malo operovať. Ďalej práca zhŕňa doterajšie uverejnené poznatky v problematike detekcie impulzných zvukov, detekcie výstrelov a triedenia rôznych, najmä impulzných, zvukov do kategórií. Publikované práce zhŕňajú a porovnávajú rôzne prístupy k detekcii, pričom v niekoľkých prípadoch dosahujú rôznych výsledkov pre rovnaké prístupy, čo môže byť dané nezohľadnením šumových vlastností zvukovej databáze prípadne inými odlišnosťami ako sú vzorkovacia frekvencia alebo kvantizácia. V niekoľkých prípadoch uvedené práce rozdeľujú úlohu detekcie prítomnosti impulzného zvuku a následné rozpoznanie o aký zvuk sa jedná s cieľom znížiť početnú náročnosť. Za úspešné boli považované metódy dosahujúce úspešnosť aspoň 80 % a množstvo falošných alarmov, prípadne chybných zatriedení pod 10 % z celkového počtu cudzích zvukov. Dosiahnuté výsledky sa líšili najmä vzhľadom k množstvu použitých parametrov, rôzne šumové podmienky, ktoré hrajú dôležitú úlohu, boli porovnávané iba v niekoľkých prácach. Záverom prvej kapitoly bolo spomenutých niekoľko zariadení určených na detekciu a v mnohých prípadoch aj lokalizáciu výstrelov, tieto zariadenia sú používané primárne armádami rôznych krajín, pričom niektoré sú určené pre ďalšie bezpečnostné zložky, prípadne pre súkromné osoby.

Na základe preštudovaných publikácií bolo potrebné navrhnúť vhodný detekčný algoritmus ktorý by ale okrem presnosti mal brať ohľad aj na obmedzené možnosti napájania. Na návrhu a overovaní algoritmu sa používal program Matlab a vopred poskytnutá zvuková databáza obmedzenej veľkosti. Za základ algoritmu boli zvolené tri parametre, konkrétne LPC koeficienty, korelácia a energia v pásmach signálu. Počas simulácie bola dosiahnutá presnosť detekcií približne 81 % v cieľovej kategórii a množstvo falošných alarmov predstavovalo 12 % v najproblematickejšej kategórii.

Pre následnú implementáciu bol zvolený signálový procesor TMS320C6713 na vývojovej doske. Zdrojový kód bol písaný v jazyku C. Boli využité mnohé možnosti pre optimálne fungovanie ako sú McBSP, EDMA alebo operačný systém reálneho času DSP/BIOS aby bolo zabezpečené spracovanie signálu v reálnom čase. Postup bol principiálne rovnaký ako počas simulácie s niekoľkými odchýlkami danými odlišnosťou dostupných zdrojov a nástrojov.

Výsledky dosiahnuté na signálovom procesore boli oproti výsledkom simulácií výrazne slabšie, dosiahnutá presnosť detekcie síce zodpovedala simulácii, množstvo falošných alarmov ale dosahovalo úrovne zhruba 70 % pre impulzné zvuky z kritickej kategórie. Možné príčiny týchto rozdielov sú rozobrané v predchádzajúcej kapitole, navrhovaným riešením je dodatočná analýza zvukov na zvolenom zariadení (signálovom procesore), ktorá bude vyžadovať aj dodatočné rozšírenie databáze nahrávok najmä v kategórii samopalov a iných strelných zbraní.

Požiadavka na binárny detektor výstrelů v reálnom čase bola splnená, hoci návrh a realizácia miniatúrnej autonómnej jednotky nebola vzhľadom na vzniknuté problémy uskutočnená. Výstupom tejto práce je zvolený algoritmus realizovaný a otestovaný na vývojovej doske so signálovým procesorom. V ďalšej práci na zariadení bude potrebné vyriešiť problém s množstvom falošných alarmov. Následne bude možný návrh samotnej autonómnej jednotky. Jej jadrom môže byť modifikovaný algoritmus navrhnutý v tejto práci, ďalšími úlohami budú vstupné obvody s mikrofónom a napájanie, výstup binárneho detektora bude pripojený k existujúcemu GPS vysielaču v súčasných obojkoch.

# LITERATÚRA

- [1] Chacon-Rodriguez, A.; Julian, P., "Evaluation of gunshot detection algorithms," *Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications, 2008. EAMTA 2008*. pp.49-54, 18-19 Sept. 2008
- [2] T. Ahmed, M. Uppal, A. Muhammad, "Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems," *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2013 IEEE, pp.513-517, 26-31 May 2013
- [3] A. Dufaux, "Detection and recognition of impulsive sound signals," Ph.D. dissertation, University of Neuchatel, Switzerland, 2001
- [4] I.L. Freire J.A. Apolinário Jr, "Gunshot detection in noisy environments," in *Proceeding of the 7th International Telecommunications Symposium*, Manaus, Brazil, 2010.
- [5] G. Duckworth, J. Barger, S. Carlson, D. Gilbert, M. Knack, J. Korn, R. Mullen, "Fixed and wearable acoustic counter-sniper systems for law enforcement," in *Proceeding SPIE International Symposium on Enabling Technologies for Law Enforcement and Security Sensors, C3I, Information, and Training Technologies for Law Enforcement*, 1998, pp. 3575–3577.
- [6] Datasheet Boomerang III, BBN technologies [online]. 2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: [http://www.bbn.com/resources/pdf/datasheet\\_BoomerangGeneral.pdf](http://www.bbn.com/resources/pdf/datasheet_BoomerangGeneral.pdf)
- [7] Oficiálna stránka produktu Shotspotter [online]. 2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.shotspotter.com>
- [8] Oficiálna stránka produktu Shotpoint [online]. 2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.databuoy.us/full-width/>
- [9] Web o bezpečnostných systémoch [online]. 2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.armada.ch/gunfire-location-system-acoustic-gunshot-detection-systems/>
- [10] M. Sigmund, "Rozpoznávání řečových signálů". Skripta FEKT VUT v Brně. Brno: MJ servis, 2007.
- [11] Datasheet k signálovému procesoru TMS320C6713 [online]. [cit. 2015-5-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c6713.pdf>
- [12] TMS320C6713 Technical Reference rev. B. 2004
- [13] Datasheet ku kodeku TLV320AIC23 [online]. [cit. 2015-5-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=277465>
- [14] TMS320C6000 DSP, Multichannel Buffered Serial Port Reference Guide [online]. [cit. 2015-5-18].



- Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/spru580g/spru580g.pdf>
- [15] TMS320C6000 Chip Support Library API Reference Guide  
[online]. [cit. 2015-5-18].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/sprc090>
- [16] TMS320C6000 DSP, Enhanced Direct Memory Access Controller Reference Guide [online]. [cit. 2015-5-18].  
Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ug/spru234c/spru234c.pdf>
- [17] TMS320C67x DSP Library Programmer's Reference Guide [online].  
[cit. 2015-5-18].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/spru657c/spru657c.pdf>
- [18] B.M. Sadler, L.C. Sadler, Tien Pham, "Optimal and robust shockwave detection and estimation," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97.*, pp.1889-1892, 21-24 Apr 1997
- [19] A. Dufaux, L. Besacier, M. Ansorge, F. Pellandini, "Automatic sound detection and recognition for noisy environment", in *Proceedings of EUSIPCO 2000, European Signal Processing Conference 2000*, pp. 1033-1036, Tampere, FI, September 5-8, 2000.

# ZOZNAM VELIČÍN, SYMBOLOV A SKRATIEK

$N$	Dĺžka vstupného bufferu
$N_{ov}$	Prekrývanie nasledujúcich okien
$f_s$	Vzorkovacia frekvencia
GPS	Global Positioning System
RMS	Root-Mean Square, efektívna hodnota
FPR	False Positive Rate, pomer falošných alarmov
TPR	True Positive Rate, pomer správnych detekcií
IIR	Infinite Impulse Response
TEO	Teager Energy Operator
DWT	Discrete Wavelet Transform, diskrétna vlnková transformácia
CWT	Continuous Wavelet Transform, spojitá vlnková transformácia
SNR	Signal-to-Noise Ratio, pomer signál-šum
LPC	Linear Predictor Coding
RBF	Radial Basis Function
SVM	Support Vector Machine
MFCC	Mel-Frequency Cepstral Coefficients
SFS	Sequential Forward Selection
FDR	Fisher Discrimination Ratio
fft	Fast Fourier Transform
ifft	Inverse Fast Fourier Transform
McBSP	Multichannel Buffered Serial Port
EDMA	Enhanced Direct Memory Access
CPU	Central Processing Unit
CSL	Chip Support Library
DMA	Direct Memory Access
FIFO	First In First Out
DSP	Digital Signal Processor